

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОНАПОРНОЙ ИНЪЕКЦИИ ГРУНТОВ

© *Дармаев Т. Г.*, кандидат физико-математических наук, доцент,  
заведующий лабораторией вычислительных  
и геоинформационных технологий  
Бурятского государственного университета  
Россия, г. Улан-Удэ  
E-mail: dtg@bsu.ru

Проведено моделирование напряженно-деформированного состояния грунта при напорной инъекции на основе идеальной упруго-пластической модели Мора-Кулона

**Ключевые слова:** усиление грунтов, напорная инъекция, модель Мора-Кулона.

### Введение

В настоящее время применяют следующие способы усиления грунтовых оснований ([1-7]):

1) уплотнение грунтов (Compaction): поверхностное и глубинное уплотнение (Dynamic Compaction), виброуплотнение (Vibro Compaction), цементирующее уплотнение (Compaction Grouting), уплотнение вертикальными элементами (Surcharging with Prefabricated Vertical Drains), уплотнение взрывным методом (Blast-Densification), вакуумное уплотнение (Vacuum-Induced Consolidation) и др. — применяются для уплотнения просадочных грунтов, рыхлых песчаных грунтов. Технология этих способов уплотнения предусматривает изменение физико-механических характеристик за счет трамбования и повышение прочностных и деформационных характеристик основания.

2) усиление грунтов: установка свай (Stone Columns), установка вибробабивных свай (Vibro Concrete Columns), укрепление стержнями (Soil Nailing), установка микросвай размером 5-10 см. (Micropiles), высоконапорная цементация с гидроразрывом (Fracture Grouting).

3) закрепление / фиксация грунтов (Fixation ) инъекционными способами: проникающая цементация (Permeation Grouting), струй-

ное укрепление (Jet Grouting), роторное смешивание грунта (Soil Mixing), химическими растворами (силикатизация, смолизация, зашелаживание), замораживание грунта (Freezing), стеклование (Vitrification) и др.. Изменение характеристик грунтов происходит либо под действием нагнетаемого цементного, цементно-песчаного или цементно-глинистого раствора, либо вследствие возникновения химической реакции между растворами крепителя и отвердителя. Растворы нагнетают в грунт через иньекторы или иньекционные скважины под давлением 0.6-1.0МПа. Способы термического закрепления грунтов предусматривают увеличение прочностных характеристик за счет глубинного обжига либо за счет искусственного замораживания. Эффект достигается за счет понижения температуры воды находящейся в порах грунта, и ее дальнейшего смерзания с грунтовыми частицами.

В данной работе моделируется напорное иньектирование растворов в грунты. В настоящее время в практике применяются следующие технологии: шелевая иньекция направленного разрыва [8], высоконапорная иньекция [9-10], манжетная технология ТАМ [11], схематично эти технологии проиллюстрированы на рис. 1 и 2.

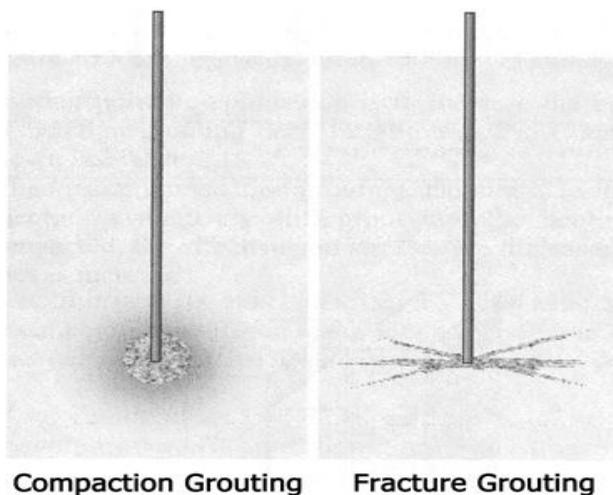


Рис. 1. Напорная иньекция без разрыва (Compaction Grouting) и с разрывом (Fracture Grouting)

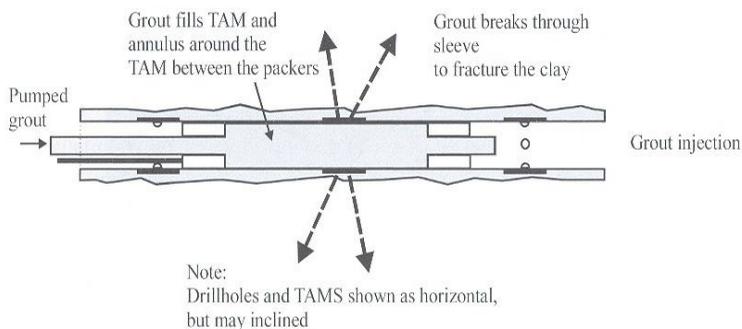


Рис. 2. Манжетная технология ТАМ

### Моделирование напряженно-деформированного состояния грунта

В настоящее время теоретическая и прикладная механика грунтов при описании напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов грунтов, взаимодействующих с инженерными конструкциями (фундаментами, стенами, сваями и др.) использует основные модели грунтов ([12–16]):

- 1) линейно-упругие (Linear elastic);
- 2) упруго-пластические (Elastic perfectly plastic — Mohr-Coloumb, Hoek-Brown);
- 3) упруго-пластические с упрочнением (Hardening elastoplastic: Cam-Clay, Capmodel);
- 4) комплексные с учетом времени, насыщенности (Swelling Cam-clay, Small strain hardening).

В данной работе моделирование напряженно-деформированного состояния грунта при напорной инъекции проведено на основе идеальной упруго-пластической модели Мора-Кулона. Рассматривалась осесимметричная задача уплотнения суглинка со следующими параметрами: плотность —  $16 \text{ кг/м}^3$ , эффективный модуль Юнга  $E = 10 \text{ МПа}$ , и эффективный коэффициент Пуассона  $\nu = 0.35$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 25$ , сцепление  $c = 5$ , угол дилатансии  $\psi = 0$ . На глубине свыше 4 м предполагалось наличие прочного, практически несжимаемого грунта. Уровень грунтовых вод предполагался на этой же глубине. Рассматривалась область радиусом 1 м, по оси которой располагался иньектор внутренним диаметром 26 мм, из которого на глубине 2,47 м нагнетался раствор под давлением (Рис.3).

Также моделировалось нагнетание раствора в разрыв шириной 1см на глубине 2,47м. (рис. 4).

Расчет фильтрационной консолидации грунта (пока поровое давление рассеивается) проводился по теории Био ([16]), при этом предполагалось выполнение закона Дарси для потока жидкости и упругое поведение скелета.

Решение задачи реализовано методом конечных элементов с использованием 15-узловых треугольных элементов и включало следующие фазы:

- 1) расчет напряженно-деформированного состояния от собственного веса грунта;
- 2) моделирование нагнетания раствора и расчет мгновенного напряженно-деформируемого состояния;
- 3) расчет консолидации грунта.

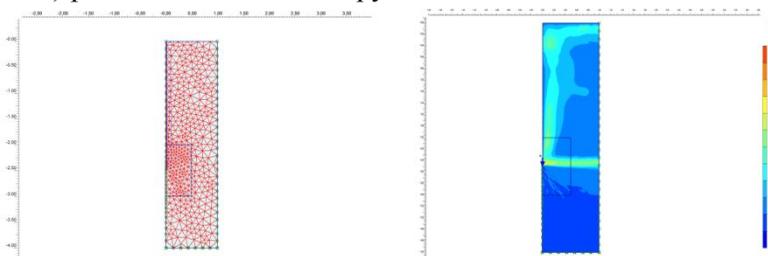


Рис. 3. Расчетная модель и поле объемных деформаций при нагнетании

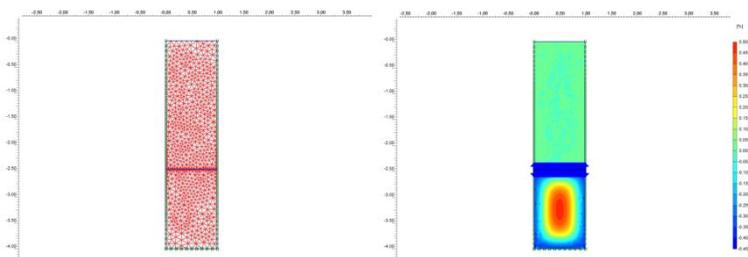


Рис. 4. Расчетная модель и поле объемных деформаций при нагнетании в разрыв

### Литература

1. Schaefer V., Abramson L., Drumbeller J., Hussin J., and Sharp K. Ground improvement, ground reinforcement, ground treatment developments 1987–

- 1997, Geotechnical Special Publication, American Society of Civil Engineers. — NewYork — 1997. — No. 69.
2. Moseley M.P. Ground Improvement. — Chapman & Hall, 1993
  3. Houlsby A C. Construction and design of cement grouting. — NewYork, John Wiley and Sons, Inc., 1990.
  4. Костерин Э. В. Основания и фундаменты. — М. : Высшая школа, 1990. — 431 с.
  5. Воронкевич С.Д. Основы технической мелиорации грунтов. — М., Научный мир, 2005. — 504 с.
  6. Кулеев М.Т. Глубинные укрепления грунтов в строительстве. — Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1983. — 75 с.
  7. Бройд И.И. Струйная геотехнология. -М.: АСВ, 2004. -448 с.
  8. Осипов В.И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах. М.:Сам полиграфист, 2012.
  9. Лубягин А.А., Миронов В.С. Способ уплотнения грунта / Патент РФ №211909, 20.09.1998.
  10. Лубягин А.А. Способ укрепления слабого грунта / Патент 2278210 от 20.06.2006
  11. Grotenhuis R. Fracture grouting in theory. Msc. Thesis Delft University of Technology, November. 2004
  12. Mitchell, J. K. and Soga, K. Fundamentals of soil behavior, 3rd edn, N.J., John Wiley and Sons, Hoboken, 2005
  13. Терцаги К. Теория механики грунтов. — М.: Госстройиздат, 1961
  14. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. — М.: АСВ, 2009. — 551с.
  15. Duncan J.M., Chang C.Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils // ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970. — № 96 (SM5). — pp. 1629–1653
  16. Biot, M.. General theory of three-dimensional consolidation // Journal of Applied Physics, — 1941. — v.12. — pp.155-164.

## MODELLING OF THE GROUTING OF SOIL

*T.G. Darmaev*, PhD, docent,  
Head of the laboratory of Buryat State University,  
Ulan-Ude, Russia,  
E-mail: dtg@bsu.ru

Modeling of the intense deformed condition of soil at a grouting on the basis of elastic perfectly plastic model Mohr-Coloumb  
*Keywords:* strengthening of soil, grouting, model Mohr-Coloumb.