

Устройство грунтоцементных колонн большого диаметра

Малинин А.Г., «Строительная компания «ИнжПроектСтрой»

Введение

В последнее время в геотехнике появился новый класс задач, эффективно решаемых с помощью струйной технологии - обработка больших грунтовых массивов для придания им качественно новых свойств – повышенной прочности, жесткости, практически полной водопроницаемости.

Одной из таких задач является устройство горизонтальных противодиффузионных завес в днище котлованов, сооружаемых в обводненных грунтах.

Другим современным направлением применения струйной технологии является повышение сейсмостойкости грунтовых оснований зданий и сооружений высокого уровня ответственности за счет сплошной цементации грунтового массива под всем пятном застройки на глубину 10-20 м.

В шахтном и тоннельном строительстве предварительная цементация больших объемов грунтовых массивов по трассе строительства подземных выработок позволяет выполнять разработку грунта с сохранением устойчивости забоя.

В дорожном строительстве струйная обработка значительных площадей дает возможность на слабых основаниях, сложенных из глинистых и заторфованных грунтов, строить железные и автомобильные дороги.

Все вышеперечисленные примеры основаны на формировании сплошных большеразмерных массивов из пересекающихся грунтоцементных колонн большого диаметра. Устройство колонн большого диаметра возможно только при применении двухкомпонентного режима струйной технологии, когда для увеличения вылета струи цементного раствора применяют мониторы с двумя коаксиально расположенными форсунками – цементной и воздушной. Через кольцевой зазор воздушной форсунки подается сжатый воздух, создающий воздушную «рубашку» вокруг струи и снижающий силы трения струи по окружающему грунту. Подробное описание различных режимов струйной технологии приведено в монографии [1].

Для сравнения укажем, что при однокомпонентном режиме (без сжатого воздуха) диаметры колонн составляют 0,6...1,0 м, а при двухкомпонентном – 1,5...4,0 м (в зарубежной практике – до 9,0 м), что дает возможность в несколько раз снизить объемы и стоимость буровых работ.

Целью настоящей работы является выявление основных закономерностей устройства колонн большого диаметра, а также построения эмпирических формул для предварительного прогноза величины диаметра

грунтоцементных колонн в зависимости от параметров струйной технологии. В основу анализа положены результаты многочисленных опытных работ, выполненных автором в период 2005-2013 гг.

Опытные работы.

Для формирования струй с высокой кинетической энергией применяют высоконапорные плунжерные насосы большой производительности.

В начале 2000-х годов насосы приводили в действие двигателями внутреннего сгорания мощностью 250 - 300 л.с. В дальнейшем, благодаря техническому прогрессу, мощность двигателей была повышена в 2-3 раза. Это дало возможность примерно в таких же пропорциях повысить кинетическую энергию струи.

Работы, выполненные автором в течение последнего десятилетия, дают уникальную возможность сопоставить результаты, полученные в широком диапазоне постепенно возрастающего уровня кинетической энергии.

Отметим, что применение более мощных насосов позволяло устанавливать на струйный монитор цементные форсунки увеличенного диаметра. Во всех опытных работах диаметр форсунок подбирали из условия, что давление нагнетания всегда находилось в диапазоне 45-50 МПа.

Опытные работы проводили в грунтах трех основных типов – суглинках, супесях и песках.

Первая группа экспериментов была проведена в 2005г. в г.Москве при устройстве горизонтальной противофильтрационной завесы в днище котлована, строящегося с супесчаных обводненных грунтах на берегу Обводного канала р.Москва.

Вторая группа экспериментов была проведена в 2012 г. в г.Нижний Новгород при усилении слабого основания под фундаментной плитой строящегося многоэтажного жилого здания. Грунты были представлены суглинками от текучепластичной до мягкопластичной консистенции.

Третья группа экспериментов была проведена в 2013 г. в г.Москва при устройстве ограждения котлована, строящегося в обводненных плотных песках. В рамках данного эксперимента была проведена серия опытов по формированию колонн при различном уровне кинетической энергии струи. Постоянство давления нагнетания 45-50 МПа обеспечивали применением форсунок различного диаметра.

В процессе проведения всех опытных работ фиксировали следующие параметры – давление нагнетания, производительность нагнетания цементного раствора, скорость подъема монитора.

В связи со сложностью измерения кинетической энергии струи ее величину определяли расчетом из условия, что кинетическая энергия струи равна потенциальной энергии, вырабатываемой высоконапорным насосом. Во всех опытных работах место расположения опытного участка находилось в непосредственной близости к узлу приготовления и нагнетания цементного раствора. Кроме того опытные колонны устраивали на небольшой глубине -

от 1,0 м до 3,5 м, поэтому потерей энергии в высоконапорных шлангах и в буровом снаряде в первом приближении можно пренебречь.

Для удобства интерпретации результатов эксперимента определяли не абсолютную, а относительную величину потенциальной энергии E , приведенную к 1 п.м. колонны.

В общем случае относительная энергия струи цементного раствора и, соответственно, относительная потенциальная энергия высоконапорного насоса может быть определена по формуле [2]:

$$E = P * Q / v_t \quad (1)$$

где E – относительная энергия, (МДж/м);

P – давление нагнетания цементного раствора, (МПа);

Q – производительность нагнетания раствора, (м³/с);

v_t – скорость подъема монитора, (м/с).

Диаметр колонн определяли непосредственным замером после откопки оголовков колонн на 1,0-1,5 м (рис.1).

По результатам измерения диаметра рассчитывали другой важный параметр, характеризующий эффективность струйной технологии – объем грунта V_C , разрушенного и перемешанного струей цементного раствора, отнесенного к 1 п.м. колонны

$$V_C = \pi D^2 / 4, \quad (\text{м}^3/\text{м}) \quad (2)$$

где D – диаметр грунтоцементной колонны.

Результаты опытных работ.

На рис.2 приведена зависимость диаметра колонн от расхода цемента (в сухом состоянии) при различных диаметрах форсунок струйного монитора. Расположение экспериментальных точек показывает очевидный факт, что увеличение количества цемента приводит к росту диаметра колонн. Хотя диаметры колонн, сформированных в глинистых грунтах, намного ниже диаметров колонн в песчаных грунтах, степень возрастания величины диаметра от количества израсходованного цемента приблизительно одинакова.

Другой важной зависимостью, определенной в ходе эксперимента, являлась зависимость объема грунтоцемента (т.е. объем грунта, разрушенного струей цементного раствора) от количества затраченной потенциальной энергии цементировочного насоса. Данный параметр характеризует эффективность технологии, т.к. прямым образом определяет основные стоимостные затраты на формирование колонн.

Результаты определения диаметра от величины относительной потенциальной энергии приведены на рис.3а-3д.

Построение эмпирических зависимостей.

Анализ расположения экспериментальных точек на рис.3а-3д показывает, что полученные результаты с хорошей степенью аппроксимации могут быть описаны линейными зависимостями. Это позволяет достаточно обосновано сформулировать следующее важное теоретическое положение - *объем разрушенного грунта пропорционально зависит от величины затраченной энергии.*

$$V_C = \lambda_V E, \quad (2)$$

где λ_V – коэффициент эффективности, ($\text{м}^3/\text{МДж}$).

Обработка результатов эксперимента позволила получить следующие значения коэффициента λ_V (табл.1).

Анализ таблицы показывает, что наибольшую эффективность технология имеет в песках, которые лучше всего подвергаются размыву струей цементного раствора.

Но даже в условиях одной площадки эффективность различается в зависимости от диаметра и формы форсунки струйного монитора. Так в песках наилучшую эффективность показало оснащение струйного монитора форсункой, имеющей максимальный диаметр 5,3 мм, производства фирмы «Специальная строительная техника» (Пермь).

Для дальнейших построений отметим, что все эксперименты были проведены в узком диапазоне давлений -45...50 МПа. Этот факт в рамках инженерных расчетов позволяет сформулировать второе принципиальное положение – *при равном давлении нагнетания расход цемента на 1п.м. колонны пропорционален относительной энергии.*

Таблица 1.

Тип грунта	Диаметр форсунки d , мм	Коэффициент эффективности λ_V , $\text{м}^3/\text{МДж}$
Суглинок	3,0	0,0375
Супесь	2,5	0,0571
Песок	3,2	0,0566
	4,0	0,0357
	5,3	0,0714

Данное положение является основой для построения простой эмпирической формулы для прогноза диаметра грунтоцементных колонн.

Учитывая, что $V_C = \pi D/4$, можно получить

$$D = K_1 \sqrt{E} \quad (2)$$

Отметим, что при одинаковом давлении нагнетания (45 МПа) и примерно одинаковой производительности нагнетания цементного раствора (300 - 350 л/мин) относительная энергия будет прямо пропорциональной величине цемента, израсходованного на 1 п.м. скважины. В этом случае для простоты анализа результатов эксперимента была построена зависимость полученного диаметра грунтоцементных колонн от расхода цемента на 1 п.м. скважины.

Результаты эксперимента показаны на рисунке 1.

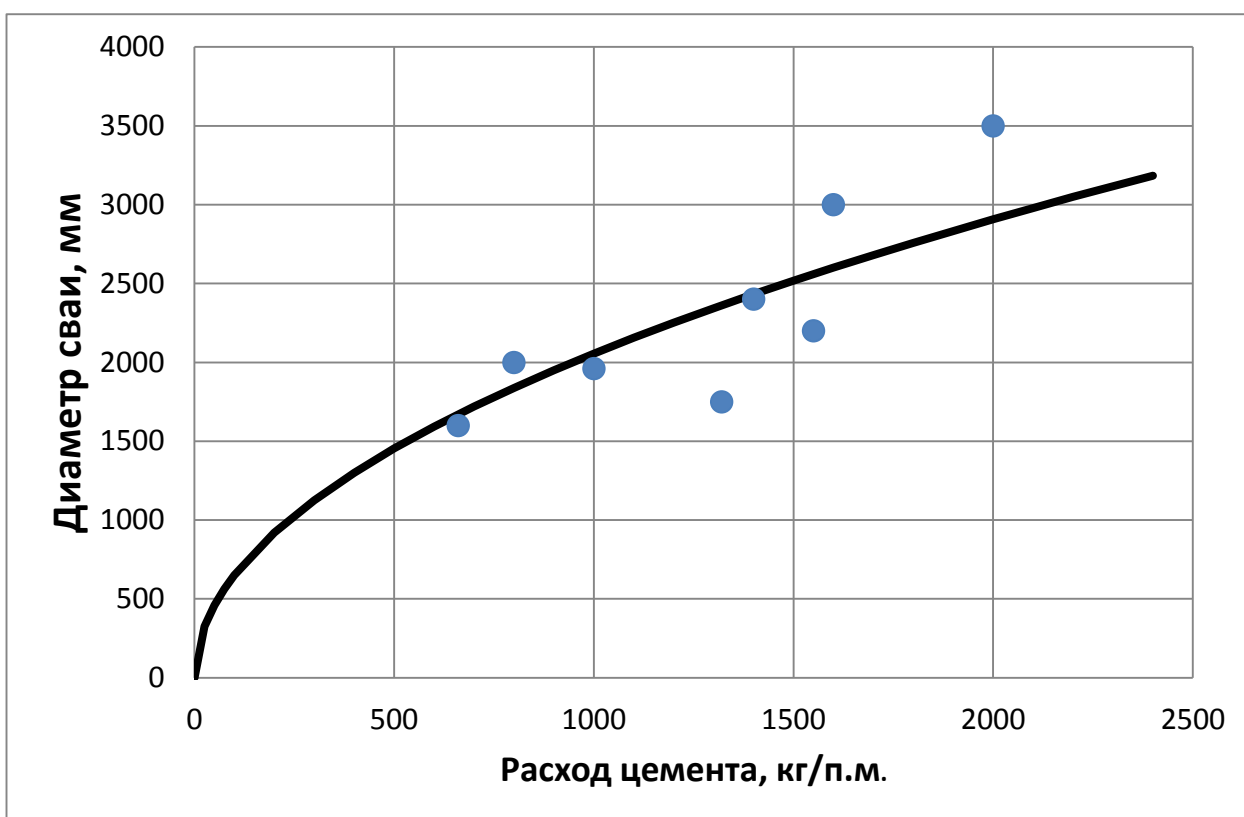


Рисунок 1 – Результаты натурального эксперимента

Разброс результатов эксперимента обусловлен применением форсунок различного диаметра. Между тем, полученные результаты действительно достаточно хорошо описываются параболической зависимостью. Обработка методом наименьших квадратов позволила получить эмпирическую зависимость диаметра грунтоцементных колонн D от расхода цемента m на 1 п.м. скважины.

$$D = 70\sqrt{m} \quad (3)$$

Полученные результаты являются основой для прогнозирования диаметров грунтоцементных колонн, устроенных в обводненных песках, и может быть использовано при проектировании сложных геотехнических объектов на территории г. Москва.



Рисунок 2 – Грунтоцементная колонна диаметром 3,5 м

Список литературы:

1. Малинин, А.Г. Струйная цементация грунтов. - М.: «Стройиздат», 2010. – 226 с.
2. Christian Kutzner, Grouting of Rock and Soil. – Rotterdam: Brookfield, 1996. – 271 p.