

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВ

Малинин А.Г., технический директор ЗАО «ИнжПроектСтрой»

1. Расчет параметров технологии струйной цементации при формировании противofiltrационной завесы в глинистых грунтах.

Основными технологическими параметрами струйной цементации грунта являются давление нагнетания, расход цементного состава и скорость подъема монитора. Именно эти параметры определяют качество цементационных работ – диаметр и сплошность грунтоцементной колонны, расход цемента на единицу объема грунта и, в конечном счете – прочность, жесткость и водонепроницаемость конструкций из грунтоцемента.

1.1. Давление нагнетания цементного раствора.

Сущность струйной цементации заключается в разрушении грунта высоконапорной струей цементного раствора с одновременным перемешиванием грунта с цементным раствором. В результате в грунтовом массиве формируется колонна из нового материала - грунтобетона, обладающего высокими деформационными и противofiltrационными характеристиками [1,2].

Разрушение грунта является достаточно сложным процессом. Специалисты фирмы TREVI Group [3] считают, что диаметр колонн коррелирует с величиной энергии, затраченной на разрушение грунта.

Общая удельная энергия E_t , отнесенной на единицу длины колонны, в первом приближении может быть определена суммированием удельных энергий струй цементного раствора E_g , воды E_w и воздуха E_a .

$$E_t = E_g + E_w + E_a$$

$$E_g = 0.1PQ/V, E_w = 0.1PQ/V, E_a = 0.035Q[(10P)^{0.29} - 1]/V,$$

где E - удельная энергия (МДж/м), P - давление нагнетания (МПа), Q - расход (л/мин), V - скорость подъема монитора (см/мин).

В случае применения однокомпонентной технологии (с использованием только водоцементной смеси) в вышеприведенной формуле следует учитывать только первое слагаемое. Таким образом, полученные зависимости показывают, что энергия разрушения грунта прямопропорциональна давлению нагнетания.

Зависимость между давлением нагнетания и диаметром колонн имеет более сложный вид. Так, например, на начальном участке зависимость между указанными параметрами является практически прямолинейной, т.е. чем больше давление, тем больше диаметр колонны. Однако для каждого типа грунта существует пороговое значение давления, после которого диаметр увеличивается незначительно.

На рис.5 показан график зависимости диаметра колонн от давления нагнетания, построенный исходя из анализа технической литературы.

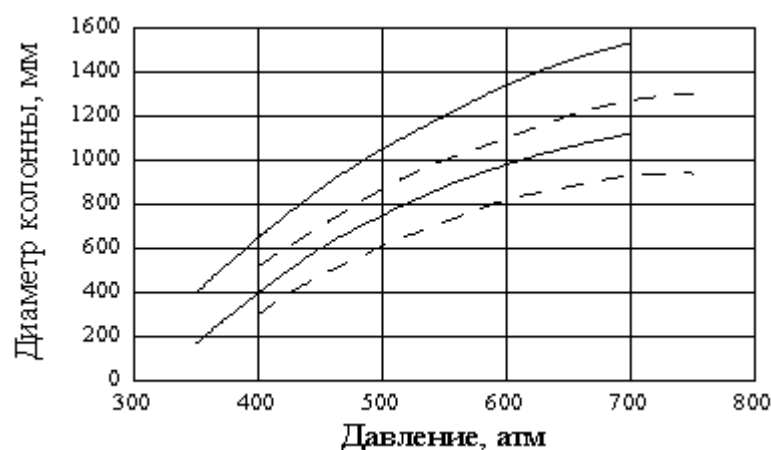


Рис.5. График зависимости диаметра грунтоцементных колонн от давления нагнетания. Сплошной линией показаны верхняя и нижняя границы диаметра колонн, полученных для песчаных грунтов, пунктиром – для глинистых грунтов.

Из графика следует, что формирование грунтоцементной колонны диаметром 700 мм в глинистых грунтах возможно при давлении нагнетания 450 атм.

1.2. Скорость вращения и шаг подъема монитора.

Эти параметры выбираются таким образом, чтобы обеспечить однородность конструкции за счет качественного перемешивания грунта с цементным раствором. Обычно это достигается при скорости вращения монитора 10-30 об/мин.

Подъем монитора осуществляется, как правило, в дискретном режиме «подъем – остановка». В момент остановки происходит обработка элементарного слоя грунтового массива. Такой режим в отличие от непрерывного подъема позволяет более надежно автоматизировать процесс и управлять им с помощью бортового компьютера. Шаг подъема монитора (единичный интервал обработки грунта) устанавливается таким образом, что бы исключить области с не промешанным грунтом с одной стороны, а с другой – не допустить перерасход цементного раствора. Экспериментально установлено, что шаг подъема монитора должен составлять 4 см. Именно эта величина является общепринятой при назначении остальных технологических параметров.

1.3. Водоцементное отношение раствора.

В зависимости от класса задач применяют растворы с различным водоцементным отношением. Стандартным считается отношение В/Ц = 1,0. В тех случаях, когда требуется повышенная прочность грунтоцементных колонн (свай), водоцементное отношение снижают, т.е. увеличивают содержание цемента в растворе. Однако следует иметь в виду, что снижение водоцементного отношения увеличивает вязкость раствора, а, главное, как показывает практика приводит к более быстрому износу технологического оборудования. Именно по этим причинам на практике не применяется отношение ниже В/Ц = 0,7. Верхний предел практически не ограничен. Известны случаи применения раствора с водоцементным отношением В/Ц = 2,0.

В обводненных глинистых грунтах рекомендуемое водоцементное отношение составляет В/Ц = 0,9.

1.4. Расход цемента на укрепление 1 м³ грунта.

Данный параметр определяет физико-механические свойства грунта – прочность, деформативность, водонепроницаемость, плотность и др. Чем больше содержание цемента, тем больше полезные свойства укрепленного грунта.

Расход цемента варьируется в широком диапазоне 350-700 кг/м³. В песчаных грунтах стандартным считается значение 450-500 кг/м³. В глинистых грунтах всегда требуется повышенный расход цемента – от 700 до 1000 кг/м³. В технической литературе приводятся случаи, когда при формировании колонн в глинистых грунтах расход цемента составлял 1200-1500 кг/м³ [4].

В задачах устройства противифльтрационных завес принимается, как правило, минимальный расход цемента. В разработанном проекте для устройства противифльтрационной завесы в глинистых грунтах был принят расход цемента 750 кг/м³.

1.5. Скорость подъема монитора.

Скорость подъема монитора совместно с производительностью насоса определяют расход цемента на 1 п.м. грунтоцементной колонны.

Для расчета скорости подъема монитора применялась методика, разработанная специалистами фирмы TECNIWELL (Италия) [5].

Скорость подъема определяется временем, затрачиваемым на подъем монитора и временем обработки элементарного слоя грунта мощностью 4 см. Так как первая составляющая намного меньше второй, при проектировании режимов скорость подъема монитора определяется, как правило, только временем обработки интервала грунта.

В первом приближении время обработки интервала определяется исходя из требуемой величины содержания цемента на 1 м³ грунта, водоцементного отношения смеси и производительности насоса.

В расчете использовались следующие исходные данные:

- диаметр грунтоцементных колонн $D = 0,7$ м,
- расход цемента 750 кг/м³,
- давление нагнетания $P = 450$ атм. (45 МПа),
- водоцементное отношение раствора $В/Ц = 0,9$,
- монитор оснащен двумя форсунками диаметром 2,2 мм.

Объем 1 п.м. грунтоцементной колонны диаметром 0,7 м составляет 0,385 м³.

Определим количество цемента, требуемое на устройство 1 п.м. колонны:

$$m_c = 750 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,385 \text{ м}^3 = 289 \text{ кг.}$$

Этой массе цемента соответствует объем раствора:

$$V_g = m_c / (1/\rho_c + WC/\rho_w) = 356 \text{ л,}$$

где ρ_c – плотность частиц цемента, ρ_w – плотность воды.

Отметим, что в настоящем расчете принято значение плотности частиц цемента $\rho_c = 3,0$ г/см³ (кг/л), что соответствует плотности частиц цемента, который поставляется отечественными цементными заводами.

Плотность водоцементного раствора составит:

$$\rho_g = m_c (1 + WC) / V_g = 1,54 \text{ кг/дм}^3.$$

Скорость истечения водоцементной струи из сопел монитора определяется в соответствии с принципом преобразования потенциальной энергии в кинетическую энергию струи. Давление, развиваемое цементировочным насосом, эквивалентно напору столба жидкости (цементного раствора) высотой

$$h = P / (\rho_g g) = 2922 \text{ м,}$$

где $P = 450$ атм. (45 МПа), $\rho_g = 1,54$ кг/дм³, $g = 9,81$ м/с² (ускорение свободного падения).

Тогда скорость истечения струи составит:

$$v = \sqrt{2gh} = 241 \text{ м/с.}$$

Расход раствора, истекающего из двух форсунок, каждая из которых имеет площадь сечения 3,8 мм², составит:

$$Q = 2 \cdot 2410 \text{ дм/с} \cdot 0,00038 \text{ дм}^2 = 1,83 \text{ л/с (109 л/мин)}$$

Время устройства 1 п.м. колонны (25 интервалов по 4см):

$$t = V_g / Q = 195 \text{ с}$$

т.е. на каждый интервал высотой 4 см обработки грунта необходимо приблизительно 7,8 секунды.

Отметим, что подобный расчет не учитывает выход части цементного раствора в виде грунтоцементной пульпы. Дело в том, что процесс разрушения и перемешивания грунта с цементным раствором не происходит мгновенно, а требует определенного времени. Причем, для связных грунтов времени, необходимого на качественную обработку одного интервала, требуется значительно больше, чем для несвязных пород. В течение этого времени часть раствора в составе грунтоцементной пульпы выходит на поверхность, поэтому для компенсации потерь время обработки следует увеличить. Уточненная методика расчета времени с учетом потерь цемента приведена в работе [6].

С учетом возможных потерь цемента в процессе проведения работ расчетное количество цемента на 1 п.м. колонны 289 кг было увеличено до 300 кг.

В заключении отметим, что для окончательного подбора параметров на опытном участке устраивают колонны при различных режимах нагнетания цементного состава. После проходки контрольных шурфов и замеров диаметра свай определяют оптимальный технологический режим.

Литература:

1. Малинин А.Г. Применение струйной цементации грунтов в подземном строительстве // Подземное пространство мира. 2000. №2.
2. Малинин А.Г. Применение технологии струйной цементации грунтов в транспортном строительстве // Метро и тоннели. 2001. №6.
3. Материалы фирмы TREVI Group (Италия), 1999.
4. Джантимиров Х.А., Долев А.А. Опыт усиления основания сооружения с помощью струйной технологии. // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2006. №1
5. Melegari C. Introduction to the Jet-Grouting Methods // Seminar on jet grouting. Singapore, 1997.
6. Малинин А.Г. Обоснование расхода цемента при струйной цементации грунта // Проблемы развития транспортных и инженерных коммуникаций, 2003, №2-3.