

УДК 624.154.1

Должиков П.Н., проф., д.т.н.,
*Донской Государственный Технический Университет, г. Ростов-на-Дону,
Россия*

Кобзарь Ю.И., доц., к.т.н.,
*Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н.
Бекетова, г. Харьков, Украина*

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЛИНОЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ НАПОРНО-ИНЪЕКЦИОННОМ УПЛОТНЕНИИ ГРУНТОВ

Известно, что напорная инъекция цементосодержащего раствора способствует формированию в грунте разнонаправленных каналов гидроразрыва. В результате этого в грунте образуется система из инъекционной трубы, цементных уширений и уплотненного грунта между ними. Эта геомеханическая система работает как единая. Поэтому по методу воздействия на грунт данный способ является комбинированным: армирование и уплотнение [1].

Исходя из конструкции буро-инъекционных свай, технологическая последовательность работ по укреплению грунтов следующая:

- бурение скважин вращательным способом с отбором керна, с целью уточнения глубины залегания слабоустойчивых грунтов;
- установка в каждую скважину иньектора;
- цементация затрубного пространства или постановка пакера; обвязка гидросистемы;
- приготовление и нагнетание инъекционного раствора заходками «снизу-вверх»; контроль качества.

Бурение скважин выполняется вращательным способом мобильной буровой установкой, например, УРБ -2А2. В качестве иньекторов используются металлические перфорированные трубы диаметром 89 мм с шагом перфорации 0,5 м. Нагнетание тампонажного раствора производится через двойной механический пакер заходками «снизу-вверх». В качестве инъекционного раствора наиболее часто используется цементный раствор плотностью 1,8 т/м³ (цемент М400 – 1200 кг; вода – 500 л). Приготовление и нагнетание цементного раствора осуществляется миксером и насосом НБ – 4. Следовательно, эффективность уплотнения грунта будет определяться иньектируемым раствором, а в нем – содержанием цемента.

Изучение уплотняемости водонасыщенных глинистых грунтов выполнялись в модернизированном приборе стандартного уплотнения. Исследования проводились на образцах суглинка с объемной массой скелета грунта в

естественном сложении $\gamma_{ск} = 1,55 - 2,0 \text{ г/см}^3$, влажностью на границе раскатывания $W_p = 0,14 - 0,22$, влажностью на границе текучести $W_T = 0,26 - 0,34$.

Результаты компрессионных исследований уплотненных образцов различного состояния приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты компрессионных испытаний грунтов

№ обр.	$\gamma_{ск}, \text{ г/см}^3$	W, д.ед	G, д.ед	e, д.ед	a, МПа ⁻¹	E, МПа	
						до уплотн.	после уплотн.
1	1.85	0.15	0.89	0.2	0.079	8.9	12.1
2	1.55	0.20	0.88	0.3	0.078	9.4	12.9
3	1.57	0.20	0.72	0.29	0.080	4.9	9.1
4	1.57	0.21	0.83	0.3	0.028	37.1	41.2
5	1.55	0.21	0.83	0.28	0.082	8.8	14.6

Анализ полученных результатов показывает, что относительное сжатие уплотненных водонасыщенных глинистых грунтов начиная с давления 0,1-0,15 МПа уменьшается в 1,5-2 раза. В некоторых случаях снижение относительного сжатия уплотненных глинистых грунтов наблюдается с первых ступеней нагрузки. Можно полагать, что под воздействием уплотнения в водонасыщенном глинистом грунте образуются новые структурные связи, в результате чего повышается сопротивление сжатию при первых ступенях нагрузки, то есть при уплотнении водонасыщенного глинистого грунта формируется новая структурная прочность. Как следует из анализа табл.1, происходит увеличение значения модуля деформации уплотненных образцов суглинка по сравнению с исходными в 1,3-1,8 раза.

Испытания по определению сопротивления грунта сдвигу проводились в сдвиговых приборах по схеме медленного сдвига в условиях завершённой консолидации с предварительным уплотнением грунтов, которое осуществлялось давлением 0,1, - 0,3 МПа при полном водонасыщении образцов.

Согласно полученным данным сцепление c , уплотненного водонасыщенного глинистого грунта, увеличилось в 1,45-2,0 раза, угол внутреннего трения - на $2-3^0$. Например, для образцов грунта с влажностью $W=0,2$ и исходной величиной $\gamma_{ск}=1,55 \text{ г/см}^3$ величина c , возросла с 0,0275 МПа до 0,0325 МПа, а величина ϕ с $26,5^0$ до 29^0 .

Математическая обработка результатов экспериментов выполнялась при помощи регрессионного анализа с использованием программных комплексов для персональных компьютеров Microsoft® Excel и Mathcad® 14. В результате чего было установлено, что эмпирические зависимости наиболее адекватно описываются линейным трендом вида

$$y = k \cdot x + b.$$

Таблица 2

Эмпирические параметры к определению сдвиговых свойств грунта

Состояние	Эмпирический параметр		
	k	b	Коэффициент корреляции, r
До уплотнения	3,70	1,00	0,73
После уплотнения	1,65	0,52	0,86

Зависимости относительного сжатия образцов грунта ε от давления P по результатам компрессионных испытаний наиболее адекватно описываются степенной функцией вида

$$\varepsilon = a \cdot P^b.$$

Эмпирические параметры a и b для зависимостей приведены в табл.3.

Таблица 3

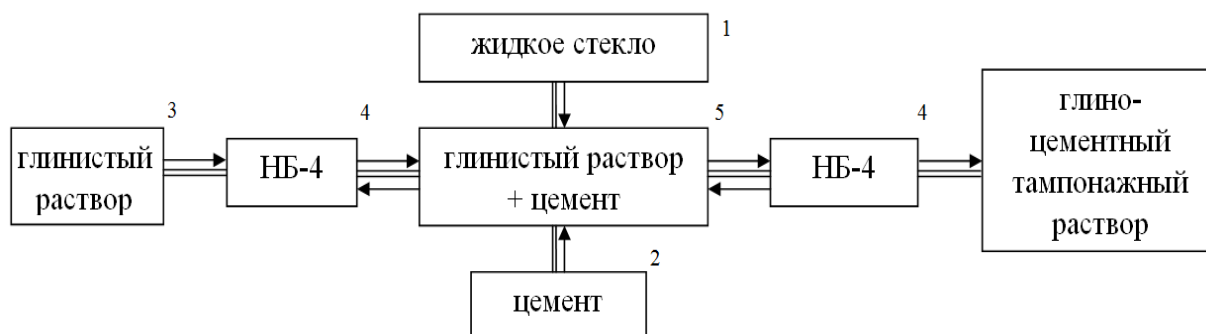
Эмпирические параметры функции относительного сжатия грунта от давления

Образцы грунта	Эмпирический параметр					
	До уплотнения			После уплотнения		
	a	b	r	a	b	r
№1	0,11	0,41	0,95	0,08	0,46	0,96
№2	0,34	0,97	0,96	0,15	0,81	0,98
№3	0,44	0,69	0,97	0,22	0,47	0,96
№4	0,13	0,39	0,98	0,37	1,35	0,92

Таким образом, экспериментально доказана степень уплотнения глинистых грунтов вокруг труб буро-инъекционных свай. Установлено, что даже при незначительных напряжениях (0,3 – 0,5 МПа) деформационно-прочностные свойства грунта вокруг труб улучшаются в 1,5-2 раза, что позволяет при проектировании работ по усилению оснований фундаментов уменьшить количество свай в 3-4 раза, при этом несущая способность свай увеличивается в 2-3 раза.

В соответствии с различными инженерно-геологическими условиями, когда необходимо быстрое твердение раствора, возможно применение цементно-силикатной рецептуры. На 1 м³ раствора вводится 870 кг цемента М400 и затем дозатором добавляется 37 кг силиката натрия (жидкого стекла). При этом силикат натрия работает как ускоритель схватывания, сокращая время твердения раствора до 20-30 минут. Прочность цементного камня снижается лишь на 8-10%.

В ряде случаев сложных инженерно-геологических условий, когда не требуется высокая прочность закрепленных грунтов, целесообразно применение глиноцементных растворов [3]. Наиболее часто глинистый раствор плотностью $1,20-1,22 \text{ г/см}^3$ готовится на основе каолиновых глин или сходных по свойствам. В глинистый раствор смеситель подает 100 кг сухого цемента М400, а затем в промежуточную емкость вводится 10 кг силиката натрия.



Готовый глиноцементный раствор непрерывно циркуляционно прокачивается насосом НБ-4 и затем нагнетается в скважину под заданным давлением (рис.1).

Рис.1. Технологическая схема приготовления и нагнетания глиноцементного тампонажного раствора: 1 – емкость с жидким стеклом; 2 – сухой цемент; 3 – накопитель глинистого раствора; 4 – насос; 5- промежуточная емкость.

Наряду с указанными рецептурами инъектируемых растворов возможно применение и ресурсосберегающих суспензий, например, на основе молотых доменных шлаков или горелых горных пород. Так в базовую шлаковую суспензию плотностью $1,45 \text{ г/см}^3$ вводится незначительное количество цемента (40-50 кг) для повышения прочности закрепления грунта.

Для названных рецептур растворов в технологических схемах постановки буро-инъекционных свай были рассчитаны их несущие способности по новой формуле для сходных инженерно-геологических условий, где учитывается и степень уплотнения грунта за счет формирования «уширений» вокруг инъекторов [3]. Анализ эффективности технологических схем выполнен по показателю «цена-качество», результаты приведены в таблице 4. Также учитывалась стоимость добавок в растворах. За базовый показатель эффективности было принято значение для первой схемы, который составил 1,25. Уменьшение количества цемента в растворе снижает этот показатель, причем минимизация (0,17) получена для глиноцементной рецептуры. Для шлакоцементной суспензии показатель эффективности составил 0,24.

Таблица 4

Эффективность инъекционных растворов

Номер схемы	Инъекционный раствор	Количество цемента, кг/м ³	Доля добавок, %	Несущая способность свай, кН
1	Цементный	1200	0	960
2	Цементно-силикатный	870	4	835
3	Глиноцементный	100	35	680
4	Шлакоцементный	40	80	420

Как следует из данных таблицы, при инъекции глино-цементного раствора количество цемента уменьшается на 92%, а несущая способность свай – лишь на 30%. При этом прочность закрепления грунта удовлетворяет условиям строительства. Для сравнения: применение шлакоцементной рецептуры снижает несущую способность свай на 56%. Поэтому наиболее целесообразно при постановке буро-инъекционных свай применение глиноцементных растворов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

5. Должиков П.Н., Збицкая В.В. Буро-инъекционная технология упрочнения оснований фундаментов. Монография.- Ростов-на-Дону: ООО «ДГТУ-принт», 2019. -174с.

6. Комплексный метод тампонажа при строительстве шахт: Учеб.пособие / Э.Я. Кипко, П.Н. Должиков, Н.А. Дудля и др. – 2-е изд., – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2004.- 415 с.

7. Должиков П.Н., Збицкая В.В. Аналитическое исследование несущей способности буро-инъекционной свай.//Зб. наук. праць ДонДТУ. Вип. (1) 42 Алчевськ: ІПЦ «Ладос». 2014.-с. 117-121.