Мустакимов В.Р.

Исследование прочности грунтоцемента для дисперсных грунтов Казани

Казанский государственный архитектурно-строительный университет
(Россия, Казань)

doi: 10.18411/lj-01-2019-132

idsp: ljjournal-01-2019-132

Аннотация

В работе приведены результаты исследований по закрепляемости цементом дисперсных сыпучих и связных грунтов, твердеющих в воздушно-влажных и влажных условиях, при различном дозировании цемента.

Ключевые слова: проблемные грунты, структурно-неустойчивые, цементация, струйная геотехнология, геотехника, грунтоцемент, прочность.

Abstract

The paper presents the results of studies on the fixability of the cement-dispersed bulk and cohesive soils, hardening in air-humid and humid conditions, with different dosing of cement.

Key words: problem soils, structurally unstable, cementation, jet geotechnology, geotechnics, primer-cement, strength.

Введение

Среди разнообразия инженерно-геологических и гидрогеологических условий при строительстве, реконструкции и эксплуатации зданий и сооружений в городе Казани, можно выделить участки, с распространением проблемных грунтов, включая: лессовые и лессовидные просадочные породы; озерно-болотные, илистые и заболоченные образования; насыпные; карстовые и закарстованные массивы; слабые водонасыщенные мелкодисперсные и заиленные пески, проявляющие плавунные свойства; глины текучей консистенции [1]. Традиционные способы фундирования в проблемных грунтах не в полной мере обеспечивают требуемую прочность, устойчивость, надежность, высокую технологичность, низкую трудоемкость и экономическую целесообразность в условиях всемерно развивающейся техники и технологии. В современном строительстве для упрочнения цементом структурно-неустойчивых и слабых грунтов оснований под фундаментами зданий или сооружений, распространение получила струйная цементация, как новая геотехнология, известная в большинстве стран как «Jet grouting method». Струйная геотехнология – многофункциональна и используется при упрочнении грунтов и возведении подземных сооружений [2, 3]. Пример подземной урбанизации с использованием подземного пространства, выполняемого при помощи струйной геотехнологии, приведен на (рис. 1) [2].

Рис. 1. Принципиальная схема подземной урбанизации при возведении многоуровневого объекта, выполняемого при помощи струйной геотехнологии [2]

1-грунтоцементные элементы, изготовленные по технологии «Jet grouting method», в массиве грунта без выемки грунта методом струйной цементации; 2-железобетонные колонны, изготовленные в буровых скважинах; 3-противофильтрационная завеса из грунтоцемента; 4-дренажная завеса из насыпного щебня в глубокой траншее, изготовленной методом «стена в грунте»; 5-площадной дренаж.

Пример реализованного автором [4] опыта применения струйной цементации, с упрочнением слабого водонасыщенного грунта основания под подошвой фундамента подземного перехода, устранением неравномерной осадки и восстановлением конструкций, приведен на (рис. 2).

a)

Рис. 2. Упрочнение слабого водонасыщенного грунта основания под подошвой фундамента подземного перехода на пересечении улиц Эсперанто-Качалова, в г. Казани, методом подведения грунтоцементных опор, выполненных по методу струйной цементации [3].

а-аврийное состояние перехода до его восстановления; б-план подземного перехода с расположением грунтоцементных опор-столбов; в-поперечный разрез ствола подземного перехода с элементами усиления; 1-ствол перехода; 2-лестницы; 3-прямой; 4-лифты; 5-элементы усиления из грунтоцемента

Технические решения, связанные с сочетанием железобетонных и грунтоцементных конструкций, включаемых в совместную работу остовов от действия внешних нагрузок и собственного веса, требуют еще более детальной проработки, а также выполнения опытной проверки и натурных экспериментальных исследований. В связи с этим автором [5, 6, 7], и проф. Токиным А.Н. [8], проведены исследования прочностных и деформационных свойств различных генетических типов упрочненных цементом грунтов различных регионов СНГ, включая города Самарканд, Ташкент. Кроме этого автором проведены исследования закрепляемости цементом проблемных грунтов Казани.

Структурообразование грунтоцемента при струйной цементации

Прочностные и деформативные свойства грунтоцемента изучались в МГУ, Союздорнии, НИИОСП, ВИСИ и других организациях. Грунтоцемент, как материал для конструкций подземных сооружений, представляет собой сложную многофазную систему, которая состоит из грунта, имеющего полидисперсный и полиминеральный состав, и гидравлического вяжущего - цемента, связывающего минеральные частицы дисперсной среды грунта в искусственно структурированный монолит. Гель, выделяющийся при гидролизе цемента, обволакивает боковую поверхность каждой минеральной частицы в пределах разрушенной гидроструей монитора грунтового массива и «склеивает» в водонерастворимую структуру. В отличие от цементного бетона грунтоцемент, как правило, не имеет в своем составе крупнообломочных фракций (щебень гравий) и его прочность зависит от вида новообразований - продуктов гидратации цемента и взаимодействия тонкодисперсной части грунта и свободной кремнекислоты с известью, выделяющейся при гидролизе цемента. В процессе гидратации цемента и кристаллизации новообразований создается неравномерный по прочности и сложный по конструкции каркас, превращающий грунт в водонерастворимый камень. В цементе преобладают кристаллизационные связи. Коагуляционные связи обуславливаются действием Ван-дер-Ваальсовых сил, для них характерна низкая прочность, зависящая от влажности грунта. [9 , 10]. Экспериментально установлено, что грунтоцемент, в отличие от бетона на цементном вяжущем, имеет более медленный набор прочности в воздушно-влажностной и водонасыщенной среде. Грунтоцемент, используемый для устройства фундаментов, оснований и подземных сооружений должен иметь достаточно высокие прочностные характеристики и быть морозоустойчивым. Если принять прочность при сжатии $R_{сж}$ грунтоцемента в возрасте 28 суток нормально-влажностного хранения за 100%, то за 90 суток $R_{сж}$ составит 130—150%, а в возрасте 2-3 лет - 200—300%. В соответствии с [8],

такие свойства материала могут быть обеспечены только наличием кристаллизационных связей, которые, обеспечиваются новообразованиями в виде гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. В грунтоцементе образуются не только двухосновные гидросиликаты кальция - продукты гидратации вяжущего в цементном бетоне, но низкоосновные тоберморитоподобные гидросиликаты.

Свободная $Ca(OH)_2$ находящаяся в грунтоцементном растворе активно взаимодействует с поверхностью минеральных частиц, коагулирует, образуя прочную коагуляционно - кристаллизационную структуру. В результате взаимодействия свободной извести с глинистыми минералами последние могут превращаться в, гидросиликаты и гидроалюминаты кальция.

Технологический процесс перемешивания грунтоцементной смеси при струйной цементации, позволяет обеспечить получение достаточно однородной цементогрунтовой смеси, в которой количество неразрушенных агрегатов грунта крупнее 5 мм может быть менее 1%.

Экспериментами автора [5, 6, 7] и других исследователей [2, 3, 8] грунтоцемент с преобладающей кристаллизационной структурой может быть получен главным образом на оптимальных грунтовых смесях (супесчаные грунты с числом пластичности $I_p = 2 - 7$ и содержанием глинистых частиц до 15%). Такие составы используются при изготовлении грунтоцементных конструкций, имеющих марку М100...200, при расходе портландцемента 15—18% (к весу воздушно-сухой грунтовой смеси), или 250-300 кг на 1 м³ грунтоцемента в деле.

С целью установления оптимального соотношения составляющих компонентов грунтоцемента, научно обоснованного и экономически целесообразного дозирования цемента при струйной цементации грунтов Казани, автором были проведены

исследования по закрепляемости грунтов цементом и подбору оптимального состава цемента для разных типов грунтов.

Исследование закрепляемости и прочности грунтоцемента

В зависимости от генезиса, места отложения осадочных пород, наименования по числу пластичности I_p , гранулометрического и минералогического состава грунтов, их закрепляемость цементом и соответственно прочность структурированного цементом камня различна.

Целью исследований являлось установление фактичекой закрепляемости цементом региональных пород дисперсных связных грунтов и достигаемой прочности при разном дозировании гидравлического вяжущего.

Для достижения поставленных целей, решены следующие задачи:

- в лабораторных условиях выполнен комплекс экспериментальных исследований в соответствии с программой;
- в качестве образцов грунта для исследований, выбраны наиболее распространенные типы дисперсных пород, характерные для города Казани и региона Татарстана, включая: пески, супеси, суглинки, глины и илы. С целью сопоставления результатов исследований использован песок и цемент;
- для оптимального расхода и дозирования цемента в грунтоцементную смесь текучей консистенции, свойственную при струйной цементации, рассмотрен полный ряд возможного содержания цемента в процентном отношении к общему объему образцов. Экспериментальное дозирование цемента составило, соответственно: 10%, 30%, 50%, 70%, 90% по объему образца;
- в связи с тем, что процессы схватывания свежееизготовленной грунтоцементной смеси и набор проектной прочности грунтоцементного камня, могут происходить в различных условиях окружающей геосреды, эксперименты проводились в воздушно-влажных и водных условиях;
- в соответствии с [8] срок испытаний образцов-цилиндров из грунтоцементного камня, был принят равным 90 суток;
- испытание всех образцов-цилиндров из грунтоцементного камня на одноосное сжатие, проведено при помощи гидравлического пресса ГП-50. Испытание проводилось до полного разрушения образцов-цилиндров;
- по результатам испытаний составлены таблицы и построены графики зависимости изменения расчетного сопротивления $R_{сж.}$, кгс, образцов-цилиндров из грунтоцемента на одноосное сжатие, от процентного содержания цемента в процентах.

Результаты исследований закрепляемости и прочности грунтов.

Закрепляемость - это процессы гидролиза и гидратации цемента в грунтоцементе. При твердении пескораствора, супесчано-глиняных и илистых грунтоцементных расворов, гидрат окиси кальция, находясь контакте кремнеземом, способствует схватыванию.

Результаты исследований приведены в таблицах 1-6. Динамика изменения расчетного сопротивления $R_{сж., кгс}$, от дозирования цемента, %, представлена на графиках зависимости $R_{сж.} = f(\%)$.

Таблица 1

**Результаты испытаний образцов-цилиндров из грунтоцемента
на одноосное сжатие под прессом, изготовленных из песка-цемента-воды**

№ образца-цилиндра	Наименование грунта	Дозирование цемента, %	Содержание грунта, %	Срок хранения, суток	Разрушающая нагрузка образцов воздушно-влажного хранения, кгс	Разрушающая нагрузка образцов влажного хранения, кгс	Графики зависимости $R_{сж} = f(\%)$, изменения расчетного сопротивления на одноосное сжатие $R_{сж}$ грунтоцементных образцов-цилиндров в зависимости от содержания или дозирование цемента в процентах, % по объему, и способа хранения в воздушно-влажной среде (лабораторный шкаф с влажными опилками) или влажной среде (в емкости в воде, с полным погружением образцов-цилиндров под воду)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Песок	10	90	90	100	110	<p align="center">Воздушно-влажное хранение</p> <p align="center">Влажностное хранение</p> <p align="center">Условные обозначения: —●— Кривая первого ряда образцов —■— Кривая второго ряда образцов —▲— Кривая третьего ряда образцов</p>
2	Песок	10	90	90	110	140	
3	Песок	10	90	90	110	170	
4	Песок	30	70	90	160	390	
5	Песок	30	70	90	190	510	
6	Песок	30	70	90	230	510	
7	Песок	50	50	90	600	690	
8	Песок	50	50	90	620	860	
9	Песок	50	50	90	780	875	
10	Песок	70	30	90	890	900	
11	Песок	70	30	90	1020	1050	
12	Песок	70	30	90	1120	1100	
13	Песок	90	10	90	590	980	
14	Песок	90	10	90	500	1530	
15	Песок	90	10	90	570	1750	

Таблица 2

**Результаты испытаний образцов-цилиндров из грунтоцемента
на одноосное сжатие под прессом, изготовленных из супеси-цемента-воды**

1	2	3	4	5	6	7	8
1	Супесь	10	90	90	300	450	<p align="center">Воздушно-влажное хранение:</p> <p align="center">Влажностное хранение:</p>
2	Супесь	10	90	90	350	410	
3	Супесь	10	90	90	410	480	
4	Супесь	30	70	90	200	400	
5	Супесь	30	70	90	320	490	
6	Супесь	30	70	90	380	580	
7	Супесь	50	50	90	400	600	
8	Супесь	50	50	90	500	610	
9	Супесь	50	50	90	550	840	
10	Супесь	70	30	90	790	950	
11	Супесь	70	30	90	780	1000	
12	Супесь	70	30	90	860	1050	
13	Супесь	90	10	90	560	1400	
14	Супесь	90	10	90	500	1500	
15	Супесь	90	10	90	560	2000	

Таблица 3

Результаты испытаний образцов-цилиндров из грунтоцемента
на одноосное сжатие под прессом, изготовленных из суглинка-цемента-воды

1	2	3	4	5	6	7	8
1	Суглинок	10	90	90	180	130	<p><u>Воздушно-влажное хранение:</u></p> <p><u>Влажностное хранение:</u></p>
2	Суглинок	10	90	90	210	140	
3	Суглинок	10	90	90	250	150	
4	Суглинок	30	70	90	180	160	
5	Суглинок	30	70	90	220	170	
6	Суглинок	30	70	90	330	220	
7	Суглинок	50	50	90	690	610	
8	Суглинок	50	50	90	770	650	
9	Суглинок	50	50	90	780	700	
10	Суглинок	70	30	90	790	890	
11	Суглинок	70	30	90	820	900	
12	Суглинок	70	30	90	830	1300	
13	Суглинок	90	10	90	950	1400	
14	Суглинок	90	10	90	980	1500	
15	Суглинок	90	10	90	1050	1550	

Таблица 4

Результаты испытаний образцов-цилиндров из грунтоцемента
на одноосное сжатие под прессом, изготовленных из глины-цемента-воды

1	2	3	4	5	6	7	8
1	Глина	10	90	90	100	150	<p><u>Воздушно-влажное хранение:</u></p> <p><u>Влажностное хранение:</u></p>
2	Глина	10	90	90	200	160	
3	Глина	10	90	90	110	170	
4	Глина	30	70	90	350	510	
5	Глина	30	70	90	390	540	
6	Глина	30	70	90	640	540	
7	Глина	50	50	90	610	670	
8	Глина	50	50	90	690	700	
9	Глина	50	50	90	730	700	
10	Глина	70	30	90	780	790	
11	Глина	70	30	90	780	1120	
12	Глина	70	30	90	1140	1020	
13	Глина	90	10	90	480	900	
14	Глина	90	10	90	490	1200	
15	Глина	90	10	90	640	1100	

Таблица 5

*Результаты испытаний образцов-цилиндров из грунтоцемента
на одноосное сжатие под прессом, изготовленных из ила-цемента-воды*

1	2	3	4	5	6	7	8
1	Ил	10	90	90	10	30	<p align="center"><u>Воздушно-влажное хранение:</u></p> <p align="center"><u>Влажное хранение:</u></p>
2	Ил	10	90	90	10	30	
3	Ил	10	90	90	10	30	
4	Ил	30	70	90	390	195	
5	Ил	30	70	90	400	200	
6	Ил	30	70	90	450	200	
7	Ил	50	50	90	500	600	
8	Ил	50	50	90	590	760	
9	Ил	50	50	90	640	1000	
10	Ил	70	30	90	750	630	
11	Ил	70	30	90	750	780	
12	Ил	70	30	90	800	1100	
13	Ил	90	10	90	850	1600	
14	Ил	90	10	90	1050	1800	
15	Ил	90	10	90	1100	2000	

Таблица 6

*Результаты испытаний образцов-цилиндров под прессом
на одноосное сжатие, изготовленных только из цемента-воды*

№ образца-цилиндра	Наименование вяжущего	Дозирование цемента, %	Содержание грунта, %	Срок хранения, суток	Разрушающая нагрузка образцов воздушно-влажного хранения, кгс	Разрушающая нагрузка образцов влажного хранения, кгс
1	2	3	4	5	6	7
1	Цемент	100	0,00	90	800	1350
2	Цемент	100	0,00	90	840	1400
3	Цемент	100	0,00	90	825	1380

Выводы

На основании проведенных автором [5, 6, 7] и другими исследователями [2, 3, 8] комплексных исследований по закрепляемости цементом дисперсных сыпучих и связных грунтов, твердеющих в воздушно-влажных и влажных (под водой) условиях, при различном дозировании гидравлического вяжущего, можно сделать следующие выводы:

1. Все использованные при исследованиях типы дисперсных сыпучих и связных грунтов, включая: песок, супесь, суглинок, глина и ил (табл. 1-6), характерные для региональных (Казань и Татарстан) инженерно-геологических условий, при их затворении с цементом в экспериментальных дозировках 10%, 30%, 50%, 70% и 90% по объему, закрепляются цементом с формированием новой водонерастворимой структуры, именуемой грунтоцемент.

2. Принимая во внимание тот факт, что грунтоцемент, как строительный материал, который используется для изготовления конструктивных элементов фундаментов и надземных конструкций, работающих в условиях воздушной среды [8], а также в условиях водонасыщенных грунтов, в качестве подземных сооружений (стены, массивы искусственных оснований, противофильтрационные завесы, обделки тоннелей, грунтоцементные анкеры и тд.) [2, 3, 4] (рис. 1, 2), программой

исследования была предусмотрена и реализована система моделирования процесса схватывания и твердения новообразования из грунтоцемента в условиях воздушно-влажного и водного хранения образцов-цилиндров (табл. 1-6, графы 6, 7). Моделирование среды хранения образцов-цилиндров, позволило установить качественные и количественные характеристики динамики изменения прочности (расчетного сопротивления $R_{сж}$, на одноосное сжатие) и установить оптимальной дозирование вяжущего для каждого из видов грунтов.

3. Экспериментально установлено, что для всех типов грунтов, дозирование цемента выше 70% по объему образцов-цилиндров, при воздушно-влажном их хранении в течение 90 суток, не приводит к дальнейшему активному росту прочности грунтоцемента, а для песка (табл.1), супеси (табл.2) и глины (табл.4) прочность образцов снижается. Это объясняется нарушением сложных реакций гидролиза и гидратации в процессе схватывания и твердения грунтоцемента, при котором требуется большое количество воды. Незначительный рост прочности грунтоцементных образцов-цилиндров изготовленных из суглинка (табл.3) и ила (табл.5), хранившихся в воздушно-влажном среде в течение 90 суток, по мнению автора следует относить к допустимым техническим погрешностям эксперимента, так как они составляют не более 5 %. Следовательно, предельно допустимое, из условий рациональности и экономической целесообразности, дозирование цемента для грунтоцементных образцов-цилиндров, изготовленных с применением песка, супеси, суглинка, глины и ила, с условиями хранения в воздушно-влажном среде, не должно превышать 70%. Анализ динамики роста прочности в этих условиях, позволяет констатировать, что активное наращивание прочности происходит в пределах дозирования от 30% до 50%. Поэтому, в зависимости от назначения изделий из грунтоцемента, изготавливаемых и эксплуатируемых в воздушно-влажном среде, оптимальным диапазоном дозирования цемента, по мнению автора, следует считать 30% - 50% по объему.

4. Динамика роста прочности цементогрунтовых образцов-цилиндров, хранящихся в водной среде (водонасыщенные грунты), при всех равных условиях исследований, имеет существенное отличие от условий хранения в воздушно-влажном среде. Как видно из экспериментально полученных численных значений динамики роста расчетного сопротивления $R_{сж}$, приведенных в графе 7, таблиц 1, 2, 3, 4, 5, а также соответствующих графиков зависимости $R_{сж} = f(\%)$, при водном хранении образцов-цилиндров, при всех дозировках цемента, включая: 10%, 30%, 50%, 70%, 90%, неизменно наблюдается повышение прочности. Это объясняется нормальным процессом прохождения реакций гидролиза и гидратации в грунтоцементных образцах-цилиндрах с достаточным количеством свободной и молекулярной влажности. Следовательно, грунтоцементные конструктивные элементы, изготовленные в водонасыщенных грунтах, при помощи современных технологий, включая, струйную геотехнологию (цементацию) [2, 3] или буросмесительный метод перемешивания [8], в зависимости от функционального назначения подземных сооружений, могут изготавливаться при любом экономически обоснованном дозировании цемента и требуемой прочности конструктивных элементов.

1. Мустакимов В. Р. Проблемы геотехники в современном строительстве и реконструкции зданий и сооружений Казани. Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. №2(6)/2006, КГАСУ, Казань, с. 66-68.
2. Бройд И. И. Струйная геотехнология.-М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004 г.-448 с.
3. Малинин А. Г. Струйная цементация грунтов / А. Г. Малинин. - М.: ОАО «Издательство «Стройиздат», 2009. – 196с.
4. Мустакимов В. Р., Шафигуллин Р. И., Якупов С. Н., Мустакимов А. В., Даминов Р. И. Опыт усиления подземных пешеходных переходов в водонасыщенных грунтах города Казани. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. Обзорно-аналитический и научно – технический журнал. №3, 2016г. С. 33-44.

5. Мустакимов В. Р. К вопросу закрепления лессовых грунтов Самарканда цементом. I-я Региональная конференция. Строительство на структурно-неустойчивых грунтах. СамГАСИ. Самарканд. 1992, с. 23-24.
 6. Мустакимов В. Р. Цементогрунт модифицированный АЦФ-3М-65. Курилиш аше-буюмлари технологиясининг самарадорлигини ошириш. СамГАСИ, Самарканд, 1995 г., с.134-136.
 7. Мустакимов В. Р. Прочность и деформативность просадочных грунтов оснований, армированных вертикальными армозлементами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., МГСУ-2004. 24с.
 8. Токин А. Н. Фундаменты из цементогрунта-М.: Стройиздат, 1984.-184с.
 9. Цытович Н. А. Механика грунтов.-4 изд., перераб. и доп.-М.: Высш. шк.,1983.-288с.
 10. Тер-Мартirosян З. Г. Механика грунтов.-М.: Издательство АСВ, 2005.-488 с.
-