



УДК 624.138.232.1004.17:551.448

Вагапов Р.Р. – инженер

E-mail: Lsf_ps@mail.ru

ГУП институт «БашНИИСтрой»

Адрес организации: 450064, Россия, г. Уфа, ул. Конституции, д. 3

Определение расчетной формы сводов в цементированной грунтовой толще над карстовой полостью

Аннотация

Целью работы являлось исследование процесса образования сводов в цементированной грунтовой толще над карстовой полостью. Для этого анализировались результаты численных и модельных исследований.

На основании сопоставления результатов подтверждена возможность определения границ вероятной области обрушения грунтов над карстовой полостью как геометрического места точек, в которых выполняется условие прочности Мора-Кулона.

Установлено, что поверхность сдвига при образовании свода обрушения в укрепленном массиве грунта над полостью имеет форму боковой поверхности цилиндра.

Ключевые слова: численные исследования, цементированные грунты, карстовая полость.

Механизм карстового провала чрезвычайно сложный процесс, зависящий от большого числа естественных и искусственных факторов, различных по своей природе. На механизм провала оказывают большое влияние региональные особенности той или иной закарстованной территории, изменяющиеся (иногда весьма существенно) как во времени (климатические условия), так и в пространстве (геологическое строение).

Одним из наиболее эффективных карстозащитных мероприятий является цементация грунтов покрывной толщи над карстующимися породами. Проекты противокарстовой цементации основания разрабатываются на основании действующих нормативных документов, в которых рекомендован тампонаж полостей и всей толщи карстующихся грунтов. Однако в практике достаточно часто эти толщи достигают значительных размеров (15-20 м) и цементация их на всю глубину до монолитных скальных грунтов, в которых карстовые полости не образуются, не представляется возможным в связи с существенным удорожанием строительства и технологическими проблемами цементации и контроля на больших глубинах. Поэтому актуальными являются исследования, направленные на снижение объемов цементации, обеспечивающей требуемый нормами уровень защиты зданий от разрушения при образовании карстовых полостей в карстующихся грунтах.

Результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния искусственно укрепленного основания фундаментов над карстовой полостью в карстующихся грунтах [1] позволили установить, что наиболее эффективно устройство укрепленного цементацией массива грунта на кровле карстующихся грунтов. При этом дополнительные деформации в основании фундаментов при образовании карстовой полости в карстующихся грунтах минимальны, а обрушение грунта в карстовую полость не допускается при условии достаточной прочности и мощности цементированных грунтов над полостью.

Расчетный прогноз возможности обрушения грунта в карстовую полость основан, как правило, на классическом представлении о распределении напряжений и механизме образования сводов над карстовыми полостями. Свод над полостью в равновесном состоянии (до момента его обрушения) можно рассматривать как область повышенных напряжений и деформаций, размер которой определяется прочностными и деформационными характеристиками грунтов. При цементации слоя грунта определенной мощности над карстующимися грунтами, в которых геологами прогнозируется рост полости, эта область зависит от мощности и характеристик цементированных грунтов, а также от максимально прогнозируемого размера полости за нормативный срок эксплуатации здания и от нагрузок от здания.

Состояние процесса обрушения характеризует превышение граничных значений растягивающих и сжимающих напряжений вокруг полости, которые могут быть получены из кругов напряжений Мора, поэтому границы области повышенных напряжений и образования сдвиговых деформаций могут быть определены с использованием условия прочности по Мору-Кулону, приняв его как граничное условие течения породы и ее обрушения. Таким образом, границы возможной области обрушения определяются как геометрическое место точек, в которых соблюдается условие прочности по Мору-Кулону:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi' + 2c' \cos \varphi' \quad (1)$$

Для подтверждения возможности определения высоты свода по условию прочности Мора-Кулона были выполнены численные исследования, результаты которых сопоставлялись с результатами экспериментальных модельных исследований для выявления механизма карстовых деформаций в водонасыщенных грунтах при обрушении кровли полости, проведенных в Дзержинской Карстовой лаборатории [2].

В эксперименте [2] проведен анализ исследований по основным свойствам водонасыщенных грунтов и закономерностям их деформаций. Проведена серия экспериментов по выявлению влияния влажности грунтов, а соответственно и их физико-механических характеристик на очертания сводов в этих грунтах над карстовыми полостями. В первом этапе исследований проведен эксперимент по выявлению закономерностей деформаций водонасыщенных грунтов под действием силы тяжести. Для эксперимента выбраны критерии подобия, основным из которых является критерий Фруда. На втором этапе изучался механизм деформации не водонасыщенных пород над карстовой полостью, в частности, характер сводообразования. При этом применялся также метод эквивалентных материалов с некоторой модификацией его для случая моделирования сдвижения грунтов с незначительным сцеплением (пески).

Экспериментальными модельными испытаниями в плоском стенде 190x150x16 см (рис. 1) были получены очертания сводов обрушения для различных характеристик экспериментального грунта и определена высота свода для разных значений диаметра полости. Для моделирования полости в нижней части стенда установлена камера, в которую помещены 2 штока, позволяющие при раздвижке создавать различную ширину полости.

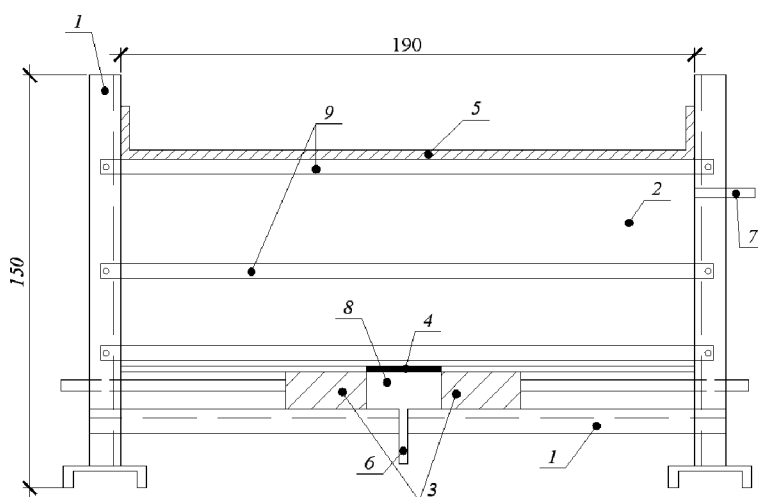


Рис. 1. Схема плоского стенда: 1. Швеллер. 2. Органическое стекло. 3. Бруски со стрежнями. 4. Крышка. 5. Скоба. 6. Сливная труба. 7. Труба, через которую производят заполнение водой модели. 8. Имитирующая полость. 9. Уголки жесткости.

В качестве экспериментального грунта использован песок с разной степенью влажности. Из физико-механических характеристик рыхлых водонасыщенных грунтов наиболее важное значение имеют силы внутреннего трения и в меньшей степени сцепления. Угол внутреннего трения (φ) песков практически не зависит от влажности

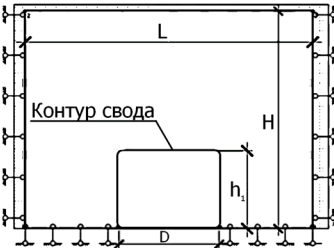
породы, но способен резко снижаться при уменьшении ее плотности. Сцепление рыхлых водонасыщенных грунтов в отличие от угла внутреннего трения существенно зависит от влажности. Благодаря этим свойствам пески подходят для моделирования грунтов различной природы в экспериментах. Мощность песка в стендах составляла 0,9 м. Укладка проводилась с послойным (0,1 м) чередованием трамбовки и рыхления. Разрыхление песка обеспечивало его сцепление с вышележащим слоем.

Имитация развития полости на модели проводилась путем быстрого (мгновенного) извлечения деревянных брусков, уложенных в основании стенда. Ширина полости при этом составляла 33 см.

Физико-механические характеристики грунта представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Обоснование применения критерия прочности «Мора-Кулона»
для определения формы «сводов» разрушения над полостью**

Численное исследование (Plaxis 2D)			Расчетная схема	Физическое моделирование (плоский стенд)		
Характеристики расчетной модели		Результат		Результат	Характеристики физической модели	
Грунты	Размеры	H ₁ /D		H ₁ /D	Размеры	Грунты
$\gamma=18 \text{ кН/м}^3$, $E=1100 \text{ кН/м}^2$, $c=2 \text{ кН/м}^2$, $\varphi=26^\circ$	D=3 м, H=8 м, L=42 м	0,63		0,66	D=33 см H=90 см L=195 см	$\gamma=18 \text{ кН/м}^3$, $E=1100 \text{ кН/м}^2$, $c=2 \text{ кН/м}^2$, $\varphi=26^\circ$, $w=18\%$
	D=6 м, H=16 м, L=42 м	0,66		0,75		
	D=10 м, H=27 м, L=42 м	0,65		0,8		
D=3 м, H=8 м, L=42 м	1	1,2		$\gamma=18 \text{ кН/м}^3$, $E=2800 \text{ кН/м}^2$, $c=6 \text{ кН/м}^2$, $\varphi=34^\circ$, $w=14\%$		
D=6 м, H=16 м, L=42 м	1,2	1,2				
D=10 м, H=27 м, L=42 м	1	1,1				

Численное исследование было выполнено в программном комплексе Plaxis 2D, используя модель Мора-Кулона, на основании расчетной модели, подобной по размерам и характеристикам проведенному эксперименту в плоском стенде [2]. При этом размер расчетной области модели L определен из условия отсутствия влияния его на результаты расчета при дальнейшем увеличении более L, а значения H и D подобраны из соотношений теории подобия. Все размеры расчетной области модели и значения расчетных характеристик грунта сведены в табл. 1. В результате выполненного численного исследования для заданных исходных данных (табл. 1) определено геометрическое место точек, в которых соблюдается условие прочности по Мору-Кулону (1) и получено значение высоты свода разрушения H₁, а также отношение высоты свода разрушения H₁ к диаметру карстовой полости D.

Расчетные значения отношения высоты свода разрушения H₁ к диаметру карстовой полости D сравнивались с экспериментальными. Результаты сравнения представлены в табл. 1, из которого следует, что расхождение полученных значений не превышает 20 %.

Таким образом, на основании сопоставления результатов численных и экспериментальных исследований подтверждена возможность определения границ вероятной области обрушения грунтов над карстовой полостью как геометрического места точек, в которых выполняется условие прочности Мора-Кулона.

С использованием данного подхода выполнены численные исследования механизма разрушения цементированного грунта основания фундамента над карстовой полостью и определены размеры сводов обрушения при условии варьирования исходных данных. Расчеты выполнены в программном комплексе «PLAXIS 3D Foundation». Границы вероятной области обрушения цементированных грунтов над карстовой полостью определялись геометрическим местом точек Мора-Кулона в сечениях над карстовой полостью по мере удаления от нее (табл. 2).

При определении варьируемых исходных данных использованы результаты исследований процессов разрушения грунтов над карстовыми полостями, опубликованные в научной литературе, что позволило выделить параметры, в большей степени влияющие на размеры вероятных областей обрушения грунтов. Это диаметр карстовой полости в карстующихся грунтах (D), прочностные и деформационные характеристики грунтов над карстовой полостью (E , c , φ) и глубина расположения карстующихся грунтов (H). Учитывая результаты исследования закрепленных цементацией массивов над карстовыми полостями, полученные авторами [1], дополнительно к перечисленным параметрам варьировалась мощность укрепленных цементацией грунтов (h). В выполненном численном исследовании перечисленные исходные данные варьировались в следующих диапазонах: диаметр карстовой (D) полости – 6, 10, 15, 20 м, характеристики природных и варианты укрепленных цементацией грунтов приведены в табл. 3, глубина расположения слоя карстующихся грунтов (H) – 33 м, 20 м, мощность укрепленных цементацией грунтов (X) – 4 м, 10 м.

Таблица 2

Определение геометрического места точек Мора-Кулона

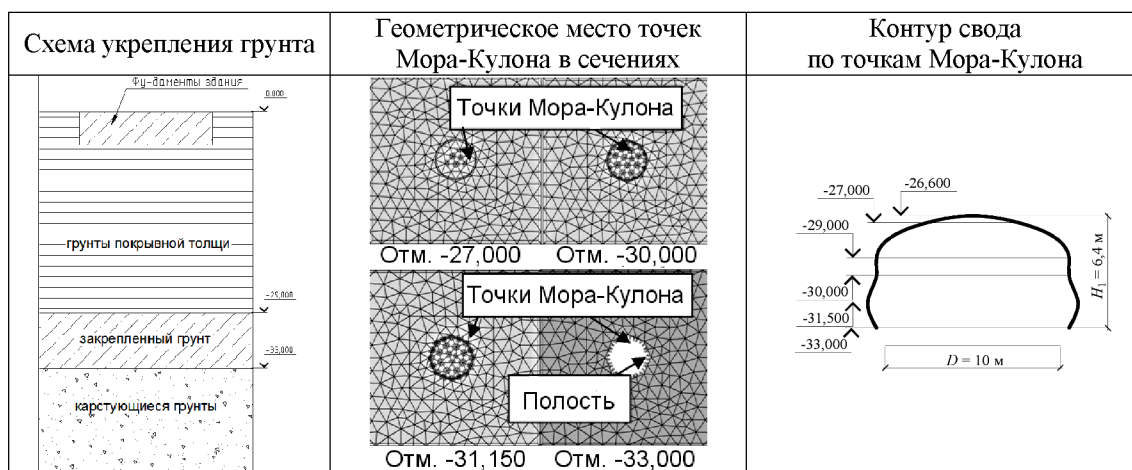


Таблица 3

Характеристики используемых грунтов

	Природные грунты	Укрепленные грунты № 1	Укрепленные грунты № 2	Укрепленные грунты № 3
Объемный вес, γ	19,9 кН/м ³	20 кН/м ³	20 кН/м ³	20 кН/м ³
Модуль деформации, E	10 мПа	30 мПа	30 мПа	30 мПа
Удельное сцепление, c	30 кН/м ²	50 кН/м ²	75 кН/м ²	100 кН/м ²
Угол внутр. трения, φ	25°	35°	35°	35°

Анализ выполненных расчетов производился путем построения границ вероятной области обрушения. Пример такого построения для карстовой полости $D=10$ м изображен на рис. 2, в результате определены высота вероятного свода обрушения грунта над полостью (H_1) и форма обрушения (цилиндр (Ω) или конус (K)). Эти результаты представлены в табл. 4.

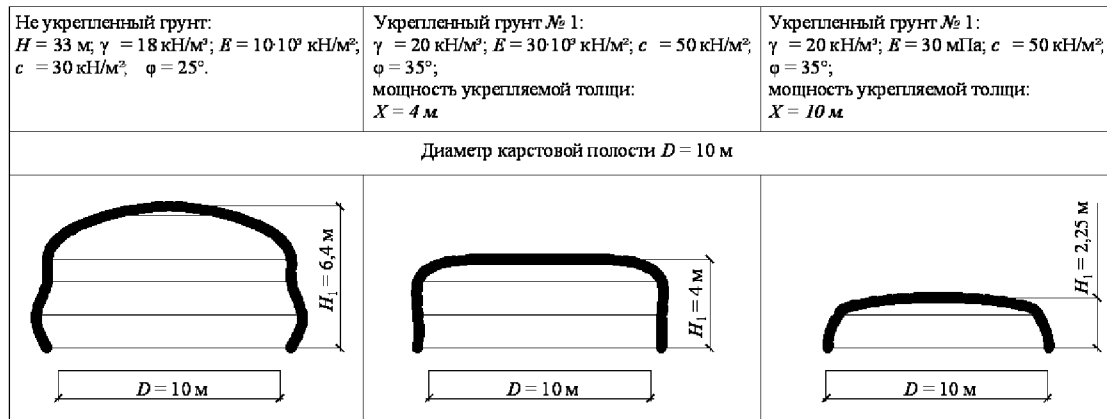


Рис. 2. Исследование формы «сводов» разрушения в основании укрепленного массива над карстовой полостью (Plaxis 3D Foundation)

Таблица 4

Высота свода (H_1) и форма обрушения

Мощность укрепленного цементацией грунта, X, м	Диаметр карстовой полости D, м	Высота свода обрушения (H_1)				Форма Обрушения
		Природный грунт*	Укрепленный грунт № 1*	Укрепленный грунт № 2*	Укрепленный грунт № 3*	
4	6	3/-**	-/-	-/-	-/-	(Ц)
	10	6,4/7	4/2	2,25/-	2,25/-	(Ц)
	15	16,56/11	16/6	8,8/3	6,58/1	(Ц)
	20	33/16	24/14	24,2/10	20,4/3	(Ц)
10	6	3/-**	-/-	-/-	-/-	(Ц)
	10	6,4/7	2,25/-	-/-	-/-	(Ц)
	15	16,56/11	8,98/4	4,1/1	-/-	(Ц)
	20	33/16	9,25/10	4,9/4	3,9/-	(Ц)

* Характеристики грунтов (табл. 3). **Числитель – $H=33$ м, знаменатель – $H=20$ м, прочерк – обрушение грунта не происходит

Анализ полученных результатов позволяет заключить следующее:

1. Высота вероятной области обрушения природного грунта над полостью в 1,5-8 раз превышает высоту области обрушения при условии искусственного укрепления грунта цементацией на кровле карстующихся грунтов.
2. При увеличении прочностных характеристик и мощности укрепленных грунтов над полостью высота вероятной области обрушения снижается.
3. Поверхность сдвига при образовании свода обрушения в укрепленном массиве грунта над полостью имеет форму эллиптического параболоида, при этом близок по форме к эллиптическому цилиндру.

Выводы:

1. Определено, что высота вероятной области обрушения природного грунта над полостью в 1,5-8 раз превышает высоту области обрушения при условии искусственного укрепления грунта цементацией на кровле карстующихся грунтов.
2. Сопоставлением модельного эксперимента с численным подтверждена возможность использования условий прочности Мора-Кулона в математическом моделировании процесса образования области обрушения (сводов) грунта над карстовой полостью.
3. Поверхность сдвига при образовании свода обрушения в укрепленном массиве грунта над полостью имеет форму эллиптического параболоида, при этом близка по форме

к эллиптическому цилиндру. В связи с этим для расчета мощности цементированного грунта над карстовой полостью [1] возможно допустить, что поверхность сдвига при образовании свода обрушения принимает форму эллиптического цилиндра.

Список литературы

1. Готман Н.З., Вагапов Р.Р. Определение мощности закрепленного массива из условия прочности цементированного грунта над карстовой полостью // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сборник статей международной научно-технической конференции / СПбГАСУ. – СПб., 2012. – С. 331-336.
2. Толмачев В.В., Давыдко Р.Б. Экспериментальные исследования деформаций рыхлых водонасыщенных пород над карстовыми полостями в связи со строительством на сильно закарстованных территориях. Научный отчет / Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве. – Дзержинск: ПНИИС, 1977. – 133 с.

Vagapov R.R. – engineer

E-mail: Lsf_ps@mail.ru

GUP Institute «BashNIStroy»

The organization address: 450064, Russia, Ufa, Konstituzii st., 3

Determination of design form of the vaults in cemented soil mass above the karst cavity

One of the most efficient karst protective measures is soil cementation of cover mass above the karsting soils. But in practice, the total stabilization of the whole soil mass is often demanded. That's why, investigations are actual to decrease cementation volumes, which keep the level of buildings failure protection while karst cavities formation in karsting soils in line with existing Codes.

The purpose of the work is investigation of the process of vaults formation in cemented soil mass above the karst cavity. For that, results of numerical and model investigations have been analyzed.

Based on comparison of numerical and model experiments, the possibility of use of Coulomb condition of stability in mathematical modeling of the process of soil failure (vaults) above the karst cavity is confirmed.

The shear plane while failure vaults formation in cemented soil mass above the cavity is stated to have the elliptical-paraboloid form similar to elliptical cylinder. In this case, to calculate the cemented soil thickness above the karst cavity, the shear plane while failure vault formation can be assumed to have the form of elliptical cylinder.

Keywords: karsting soils, cement-bound soils, karst cavity, numerical investigations.

References

1. Gotman N.Z., Vagapov R.R. Determination of stabilized soil mass thickness from strength condition of cemented soil above the karst cavity // Numerical design methods in practical geotechnical engineering: Proceedings of International Scientific Conference / SPbGASU. – SPb., 2012. – P. 331-336.
2. Tolmachev V.V., Davydko R.B. Experimental investigations of deformations of water saturated loose above the karst cavity when construction on the areas with karst risk. Scientific report / Production and scientific-research Institute on survey investigation in construction. – Dzerzhinsk: PNIIS, 1977. – 133 p.