

Технологии стабилизация глинистых грунтов с применением наноматериалов

Г.И. Лазоренко

Ростовский государственный университет путей сообщения

Аннотация: Проведен обзор существующих наноматериалов для стабилизации глинистых грунтов. Проанализированы возможности и ограничения известных нанотехнологических подходов к стабилизации глинистых грунтов. Описано влияние наноматериалов на физико-механические свойства глинистых грунтов.

Ключевые слова: грунт, глинистый минерал, несущая способность, стабилизация грунтов, наноматериал.

В процессе строительства и эксплуатации инженерных сооружений на основаниях, сложенных слабыми глинистыми грунтами, неизбежно возникает проблема повышения их несущей способности и снижения деформативности. Для преодоления этих трудностей в инженерной практике применяются различные методы укрепления грунтов, среди которых одним из наиболее распространенных и эффективных, является химическая стабилизация [1].

В отечественной и зарубежной практике в качестве стабилизаторов грунтов традиционно используется цемент, известь, зола уноса и битумные материалы [2, 3]. Новые и нетрадиционные стабилизаторы включают жидкие полимеры, ферменты, смолы, кислоты, производные лигнина и др. [4 - 7]. В нескольких недавних исследованиях сообщалось об улучшении свойств слабых грунтов с использованием различных типов геополимеров [8, 9].

Ускоренное развитие нанотехнологий и внедрение их в технологический комплекс в последнее десятилетие стимулировало повышение интереса к использованию наноматериалов в широком спектре геотехнических применений, включая стабилизацию грунтов [10, 11]. Одним из примеров таких применений являются многостенные углеродные нанотрубки (УНТ).

Многостенные УНТ обладают уникальными механическими и электрофизическими свойствами, включающими чрезвычайно высокую проч-

ность, твердость, модуль Юнга и показатели упругости, что обуславливает высокий потенциал их использования в качестве эффективного армирующего компонента для повышения прочностных свойств материалов [12]. Использование углеродных нанотрубок в цементных фазах обеспечивает армирующий эффект на наноразмерном уровне и способствует дальнейшей гидратации цемента благодаря своей высокой реакционной способности. Совместное использование цементного вяжущего и многостенных УНТ в целях стабилизации грунта по большей части, направлено на уменьшение межчастичных расстояний и заполнению нанопорового пространства, способствуя созданию более прочной и жесткой матрицы скелета грунта, обеспечивая вместе с цементом синергетический эффект по улучшению механических свойств [13]. Однако, существенной проблемой использования УНТ для стабилизации грунтов является их повышенная тенденция к агрегации. Даже при сравнительно низких концентрациях возникает проблема с самоагрегированием, которая снижает размерный эффект, что приводит к потере их полезных свойств. Для решения этой проблемы обычно используют поверхностно-активные вещества и ультразвуковое диспергирование наночастиц в суспензии. В частности, Correia и соавторами [14] показано, что введение наночастиц многостенных УНТ в стабилизированный портландцементом глинистый грунт способствует значительному увеличению механических характеристик. Используя многостенные углеродные нанотрубки, авторы добились увеличения предела прочности на одноосное сжатие на 77% грунта и увеличения модуля Юнга на 155% [15]. Максимальные значения механических характеристик грунта были достигнуты в присутствии амфотерных и неионных поверхностно-активных веществ, используемых авторами для обеспечения наибольшей степени диспергации УНТ.

Другим примером наночастиц, используемых для комплексной стабилизации глинистых грунтов с применением вяжущих, является нанокремне-

зем. Наночастицы SiO_2 проявляют повышенную пуццолановую активность, обусловленную высоким содержанием реактивного кремнезема [16]. Изменения, наблюдаемые в цементных смесях, модифицированных наночастицами SiO_2 , являются результатом химической реакции между SiO_2 и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в процессе гидратации цемента [17]. Нано- SiO_2 ускоряет гидратацию цемента вследствие его высокой поверхностной энергии и способствует повышению плотности упаковки частиц [18]. В частности, Bahmani и соавторами [19] наночастицы SiO_2 были использованы для укрепления глинистого грунта с целью уменьшения расхода цемента и ускорения процесс стабилизации. Результаты проведенных авторами экспериментальных исследований показали, что добавление нано- SiO_2 способствует резкому увеличению прочности образцов на сжатие почти в 2 раза. При этом, наибольший эффект достигается при сравнительно низких концентрациях SiO_2 (0.4%) и более мелкодисперсной фракции (15 нм). Аналогичный результат был получен Ghasabkolaei и соавторы [20], исследовавшими влияние нано- SiO_2 на свойства глинистого грунта, стабилизированного 9% цемента. Было обнаружено, что небольшое количество нанокремнезема (1,5% по массе цемента) обеспечивает значительное (до 38%) увеличение прочности обработанной цементом глины на сжатие. Кроме этого, наблюдалось существенное ускорение гидратации цемента.

С точки зрения геоэкологической инженерии высокий потенциал для использования в качестве экологически безопасных наноматериалов для стабилизации глинистых грунтов имеют наноглины, представляющие собой наночастицы слоистых силикатов, преимущественно группы смектита [21]. Получение наноглин заключается в обогащении природных смектит-содержащих глин с последующим выделением глинистой фракции центрифугированием, фильтрацией или ультрацентрифугированием с последующим их измельчением и механоактивацией [22].

Tabarsa и соавторы [23] по результатам лабораторных исследований показали, что добавление 0.5-3% наноглины (монтмориллонит фракции 1-2 нм) к лессовому грунту увеличивает его число пластичности, оптимальную влажность, предел прочности на одноосное сжатие и удельное сцепление. Исследуемые наноглины были успешно использованы авторами для укрепления откосов оросительного канала с целью их защиты от водной эрозии. Другие исследователи сообщили, что добавление наноглины улучшает эрозионную стойкость супесчаных грунтов [24]. Zomogodian и соавторы [25] исследуя прочность грунта стабилизированного наноглиной и нанокремнеземом, сообщили об увеличении прочности на одноосное сжатие и уменьшения числа пластичности грунта в результате стабилизации. В работе Khalib и др. [26] выполнено экспериментальное исследование эффективности использования наноглин для увеличения предела текучести, сдвиговой прочности и прочности на сжатие грунта. Результаты лабораторных испытаний показали, что применение порядка 3% наноглин на 25% уменьшает число пластичности грунта и до 22% увеличивает прочность на одноосное сжатие, что объясняется авторами увеличением взаимодействия и связыванием наночастиц со скелетом глинистого грунта. Аналогичные результаты были получены в работе Majeed и соавторов [27].

Люо и др. [28] исследовали влияние наночастиц оксида алюминия на свойства глинистого грунта, стабилизированного зольной пылью и цементом в соотношении 3:1. Заменив 15% грунта приготовленной смесью вяжущего с добавлением 1, 2 и 3% наночастиц Al_2O_3 , авторами были проведены измерения предела текучести, прочности на сжатие, характеристик набухания, а также оптимальной влажности и максимальной плотности стабилизированного грунта. Показано, что добавление 1% наночастиц Al_2O_3 обеспечивает увеличение прочности стабилизированного грунта на одноосное сжатие в 4.2

раза и приводит к уменьшению числа пластичности на 85% и свободного набухания на 86%.

Анализ количественного влияния наноматериалов на физико-механические характеристики стабилизированных глинистых грунтов представлены в табл. 1.

Таблица № 1

Наноматериалы, используемые для стабилизации глинистых грунтов

Наноматериал	Концентрация, % (масс.)	Активные компоненты	Эффекты		Авторы, источник	
			Характеристика*	Изменение, %		
Многостенные УНТ	0.001...0.1	цемент, ПАВ	R	+77	Correia и др. [14]	
			E	+110		
	0.01... 0.1	цемент, ПАВ	R	+77	Figueiredo и др. [15]	
			E	+155		
	0.05...0.2	-	K_{ϕ}	-43	Alsharef и др. [13]	
			W_{onm}	-5		
			ρ	+2		
	Наночастицы SiO_2	0.2...1	цемент	R	+80	Bahmani и др. [19]
				W_{onm}	+31	
ρ				-9		
1...3		цемент	R	+37	Ghasabkoei и др. [20]	
			E	+40		
			I_p	-50		
1...3		известь	R	+82	Mostafa и др. [30]	
			E	+54		
			I_p	-30		
			ε_{swo}	-63		
0.5...5		известь	ε_{swo}	-93	Pashabavandpouri и др. [31]	
			I_p	-80		
			W_{onm}	+9		
			ρ	-9		
Наноглина		0.2...3	-	R	+90	Tabarsa и др. [23]
	W_{onm}			+7		
	c			+130		
	ϕ			-30		

Продолжение Таблицы 1

Нanomатериал	Концент- рация, % (масс.)	Активные компоненты	Эффекты		Авторы, источник	
			Харак- тери- стика*	Изме- нение, %		
	1...3	-	R	+35	Mohamma di и др. [32]	
			I_p	-29		
	2...4	-	I_p	-25	Khalib и др. [26]	
			R	+22		
			c	-75		
			φ	+17		
	Наночастицы Al_2O_3	1...3	цемент, золь- ная пыль	R	+320	Lou и др. [28]
				I_p	-85	
ε_{swo}				-86		
W_{opt}				+12		
ρ				-2		
0.05...0.3		-	K_ϕ	-65	Taha и др. [29]	
			ε_{swo}	-39		
Наночастицы CuO		0.15...0.7	-	K_ϕ	-48	Taha и др. [29]
				ε_{swo}	-51	
		0.3...1.0	-	R	+50	Majeed и др. [33]
	ρ			+4		
Наночастицы MgO	0.1...0.4	-	R	+20	Majeed и др. [33]	
			ρ	+4		
Наночастицы TiO_2	0.5...2	-	W_L	-60	Babu и др. [34]	
			W_{opt}	-5		
			ρ	+3		
			c	+87		

* Условные обозначения:

K_ϕ – коэффициент фильтрации;

W_{opt} – оптимальная влажность;

c – удельное сцепление;

R – предел прочности на одноосное сжатие;

W_L – влажность на границе текучести;

W_p – влажность на границе раскатывания

E – модуль Юнга;

ρ – плотность сухого грунта;

φ – угол внутреннего трения;

I_p – число пластичности;

ε_{swo} – свободное набухание.

Из проведенного анализа видно, что в последнее десятилетие наметился рост научно-исследовательской деятельности в области применения наноматериалов для стабилизации глинистых грунтов с целью увеличения надёжности и сроков службы оснований инженерных сооружений, а также снижения стоимости строительства и ремонтов за счет использования местных глинистых грунтов при устройстве оснований. Наночастицы обладают повышенной реакционной способностью, обусловленной их чрезвычайно высокой удельной площадью поверхности и поверхностными нескомпенсированными зарядами. В результате этих особенностей наночастицы активно взаимодействуют с частицами грунта и вяжущим материалом. Наличие сравнительно малых массовых концентраций наночастиц может оказывать значительное влияние на физико-механические свойства глинистого грунта. Использование наночастиц способствует увеличению прочности стабилизированных грунтов на сжатие, уменьшению набухания, усадки, а также водопроницаемости и пластичности. Это справедливо как в случае наличия в их составе компонентов, способных в различной степени оказывать структурообразующий эффект (различные вяжущие), так и в случае их отсутствия.

Результаты, рассмотренных в обзоре исследований показывают широкие возможности стабилизации глинистых грунтов различными наноматериалами. Однако из проведенного анализа также видно, что по-прежнему существует ряд проблем, которые необходимо преодолеть для доведения разрабатываемых технологий стабилизации грунтов с использованием наноматериалов до широкого практического применения. К ним, в частности, относится необходимость более глубокого научного обоснования экологической безопасности применяемых наноматериалов, исследование механизмов их взаимодействия с различными порообразующими минералами глин, а также оценка длительной прочности стабилизированных грунтов.

Работа выполнена при поддержке Гранта ФГБОУ ВО РГУПС на выполнение научных исследований (Договор от 04 мая 2016 г. № 920/2).

Литература

1. Абрамова Т.Т., Босов А.И., Валиева К.Э. Использование стабилизаторов для улучшения свойств связных грунтов // Геотехника. 2012. №3. С. 4-28.

2. Кочерга В.Г., Зырянов В.В., Ланко А.В. Применение гидрофобизированных цементогрунтов в нижних слоях дорожной одежды // Инженерный вестник Дона, 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/853.

3. Абрамова Т.Т., Босов А.И., Валиева К.Э. Стабилизаторы грунтов в отечественном дорожном и аэродромном строительстве // Дороги и мосты. 2013. №2(30). С. 060-085.

4. Лазоренко Г.И. Теоретическое исследование влияния нанодобавок на физические свойства монтмориллонитовых глин // Инженерный вестник Дона, 2011, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/523.

5. Latifi N., Rashid A.S., Siddiqua S., Horpibulsuk S. Micro-structural analysis of strength development in low-and high swelling clays stabilized with magnesium chloride solution-a green soil stabilizer // Applied Clay Science. 2015. №118. pp. 195–206.

6. Latifi N., Meehan C.L., Majid M.Z., Horpibulsuk S., Strengthening montmorillonitic and kaolinitic clays using a calcium-based non-traditional additive: a micro-level study // Applied Clay Science. 2016. №132. pp. 182–193.

7. Latifi N., Eisazadeh A., Marto A., Meehan C.L. Tropical residual soil stabilization: a powder-form material for increasing soil strength. // Construction and Building Materials. 2017. №147. pp. 827–836.



8. Ahirwar J., Kaur M., Kumar P. Stabilization of Expansive Soil (Black Cotton soil) Using Geopolymer // International Journal of Civil, Mechanical & Production Engineering. 2016. №2 (4). pp. 1-3.

9. Ayyappan A., Palanikumar S., Kumar D., Vinoth. M. Influence of Geopolymers in the Stabilization of Clay Soil // International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research. 2017. №5 (9). pp. 108-120.

10. Wilson M.A., Tran N.H, Milev A.S., Kannangara G.S., Volk H., Lu G.Q. Nanomaterials in soils // Geoderma. 2008. №146 (1). pp. 291–302.

11. Rao N.V., Rajasekhar M., Vijayalakshmi K., Vamshykrishna M. The future of civil engineering with the influence and impact of nanotechnology on properties of materials // Procedia Materials Science. 2015. №10. pp. 111–115.

12. Yengejeh S.I., Kazemi S.A., Öchsner A. Carbon nanotubes as reinforcement in composites: A review of the analytical, numerical and experimental approaches // Computational Materials Science. 2017. №136. pp. 85-101.

13. Alsharif J.M., Taha M.R., Firoozi A.A., Govindasamy P. Potential of Using Nanocarbons to Stabilize Weak Soils // Applied and Environmental Soil Science. 2016. pp. 1–9.

14. Correia A.S., Casaleiro P.D., Graça M., Rasteiro B.V. Applying multiwall carbon nanotubes for soil stabilization // Procedia Engineering. 2015. №102. pp. 1766–1775.

15. Figueiredo D.T., Correia A.S., Hunkeler D., Graca M., Rasteiro B.V. Surfactants for dispersion of carbon nanotubes applied in soilstabilization // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2015. №480. pp. 405–412.

16. Naji Givi A, Abdul Rashid S., Aziz F.N., Salleh M.A. The effects of lime solution on the properties of SiO₂ nanoparticles binary blended concrete. Composites Part B: Engineering. 2011. №42 (3). pp. 562–569.

17. Farzadnia N., Ali A.A., Demirboga R. Development of nanotechnology in high performance concrete // *Advanced Materials Research*. 2012. №364. pp.115–118.
 18. Ltifi M., Guefrech A., Mounanga P., Khelidj A. Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars. *Procedia Engineering*. 2011. №10. pp. 900–905.
 19. Bahmani S.H., Huat B.B., Asadi A., Farzadnia N. Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement // *Construction and Building Materials*. 2014. №64. pp. 350–359.
 20. Ghasabkolaei N., Janalizadeh A., Jahanshahi M., Roshan N., Ghassemi S.E. Physical and geotechnical properties of cementtreated clayey soil using silica nanoparticles: an experimental study // *The European Physical Journal Plus*. 2016. №131 (5). pp. 1–11.
 21. Uddin F. Clays, nanoclays and montmorillonite minerals // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2008. №39 (12). pp. 2804–2814.
 22. Floody M.C., Theng B., Reyes P., Mora M. Natural nanoclays: applications and future trends – a chilean perspective // *Clay Minerals*. 2009. №44. pp. 161–176.
 23. Tabarsa A., Latifi N., Meehan C.L., Manahiloh K.N. Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay – A sustainable material for construction // *Construction and Building Materials*. №158. 2018. pp. 454–463.
 24. Iranpour B., Haddad A. The influence on nanomaterials on collapsible soil treatment // *Engineering Geology*. 2016. №205. pp. 40–53.
 25. Zomorodian S.M., Moghispour S., Soleymani A., O’Kelly B. Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives. *Applied Clay Science*. 2017. №140. pp. 140–147.
-

26. Khalid N., Arshad M., Mukri M., Mohamad K., Kamarudin F. Influence of nano-soil particles in soft soil stabilization // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2015. №20. pp. 731-738.

27. Majeed Z.H., Taha M.R. Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a Penang soft soil // *Asian Scientific Research* 2012. №2 (11). pp. 587–592.

28. Lou H.L., Hsiao D.H., Lin C.K. Cohesive soil stabilized using sewage sludge ash/cement and nano aluminum oxide // *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2012. №1 (1). pp. 83–100.

29. Taha M.R., Taha O.M. Influence of nanomaterial on the expansive and shrinkage soil behavior // *Journal of Nanoparticle Research*. 2012. №14. pp. 1–13.

30. Mostafa A.E., Ouf M.S., Elgendy M.F. Stabilization of Subgrade Pavement Layer Using Silica Fume and Nano Silica // *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2016. №7(3). pp. 573–581.

31. Pashabavandpour M.A., Jahangiri S. Effect of nano silica on swelling, compaction and strength properties of clayey soil stabilized with lime // *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*. 2015. №5 (7S). pp. 538–548.

32. Mohammadi M., Niazi M. Investigation of Nano-clay effect on geotechnical properties of rasht clay // *International journal of advanced scientific and technical research*. 2013. №3 (3). pp. 37–46.

33. Majeed Z.H., Taha M.R., Jawad I.T. Stabilization of Soft Soil Using Nanomaterials. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2014. №8(4). pp. 503-509.

34. Babu S., Joseph S. Effect of Nano Materials on Properties of Soft Soil // *International Journal of Science and Research*. 2016. №5(8). pp. 634–637.

References

1. Abramova TT, Bosov AI, Valieva K.E. *Geotekhnika*. 2012. №3. pp. 4-28.



2. Kocherga V.G., Zyryanov V.V., Lanko A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/853.
3. Abramova TT, Bosov AI, Valieva K.E. Dorogi i mosty. 2013. №2 (30). pp. 060-085.
4. Lazorenko G.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2011, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/523.
5. Latifi N., Rashid A.S., Siddiqua S., Horpibulsuk S. Applied Clay Science. 2015. №118. pp. 195–206.
6. Latifi N., Meehan C.L., Majid M.Z., Horpibulsuk S., Applied Clay Science. 2016. №132. pp. 182–193.
7. Latifi N., Eisazadeh A., Marto A., Meehan C.L. Construction and Building Materials. 2017. №147. pp. 827–836.
8. Ahirwar J., Kaur M., Kumar P. International Journal of Civil, Mechanical & Production Engineering. 2016. №2 (4). C. 1-3.
9. Ayyappan A., Palanikumar S., Kumar D., Vinoth. M. International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research. 2017. №5 (9). pp. 108-120.
10. Wilson M.A., Tran N.H, Milev A.S., Kannangara G.S., Volk H., Lu G.Q. Geoderma. 2008. №146 (1). pp. 291–302.
11. Rao N.V., Rajasekhar M., Vijayalakshmi K., Vamshykrishna M. Procedia Materials Science. 2015. №10. pp. 111–115.
12. Yengejeh S.I., Kazemi S.A., Öchsner A. Computational Materials Science. 2017. №136. pp. 85-101.
13. Alsharif J.M., Taha M.R., Firoozi A.A., Govindasamy P. Applied and Environmental Soil Science. 2016. pp. 1-9.
14. Correia A.S., Casaleiro P.D., Graça M., Rasteiro B.V. Procedia Engineering. 2015. №102. pp. 1766–1775.

15. Figueiredo D.T., Correia A.S., Hunkeler D., Graca M., Rasteiro B.V. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2015. №480. С. 405–412.

16. Naji Givi A, Abdul Rashid S., Aziz F.N., Salleh M.A. The effects of lime solution on the properties of SiO₂ nanoparticles binary blended concrete. Composites Part B: Engineering. 2011. №42 (3). pp. 562–569.

17. Farzadnia N., Ali A.A., Demirboga R. Advanced Materials Research. 2012. №364. pp.115–118.

18. Ltifi M., Guefrech A., Mounanga P., Khelidj A. Procedia Engineering. 2011. №10. pp. 900–905.

19. Bahmani S.H., Huat B.B., Asadi A., Farzadnia N. Construction and Building Materials. 2014. №64. pp. 350–359.

20. Ghasabkolaei N., Janalizadeh A., Jahanshahi M., Roshan N., Ghassemi S.E. The European Physical Journal Plus. 2016. №131 (5). pp. 1–11.

21. Uddin F. Metallurgical and Materials Transactions A. 2008. №39 (12). pp. 2804–2814.

22. Floody M.C., Theng B., Reyes P., Mora M. Clay Minerals. 2009. №44. pp. 161–176.

23. Tabarsa A., Latifi N., Meehan C.L., Manahiloh K.N. Construction and Building Materials. №158. 2018. pp. 454–463.

24. Iranpour B., Haddad A. Engineering Geology. 2016. №205. pp. 40–53.

25. Zomorodian S.M., Moghispour S., Soleymani A., O’Kelly B. Applied Clay Science. 2017. №140. pp. 140–147.

26. Khalid N., Arshad M., Mukri M., Mohamad K., Kamarudin F. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2015. №20. pp. 731–738.

27. Majeed Z.H., Taha M.R. Asian Scientific Research 2012. №2 (11). pp. 587–592.



28. Lou H.L., Hsiao D.H., Lin C.K. International Journal of Transportation Science and Technology. 2012. №1 (1). pp. 83–100.
29. Taha M.R., Taha O.M. Journal of Nanoparticle Research. 2012. №14. pp. 1–13.
30. Mostafa A.E., Ouf M.S., Elgendy M.F. International Journal of Scientific and Engineering Research. 2016. №7 (3). pp. 573–581.
31. Pashabavandpour M.A., Jahangiri S. Journal of Applied Environmental and Biological Sciences. 2015. №5 (7S). pp. 538–548.
32. Mohammadi M., Niazi M. International journal of advanced scientific and technical research. 2013. №3 (3). pp. 37–46.
33. Majeed Z.H., Taha M.R., Jawad I.T. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2014. №8 (4). pp. 503–509.
34. Babu S., Joseph S. International Journal of Science and Research. 2016. №5(8). pp. 634–637.