

黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析

张忠苗, 邹健, 贺静漪, 王华强

(浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 开发了一种实验室模拟土体注浆的试验装置, 能形成完整的试样。通过注浆模拟试验, 实现了黏土注浆过程中压密浆泡及劈裂裂隙的自然产生与发展。试验结果表明: 在黏土注浆中压滤效应贯穿于整个注浆过程, 即在高压的作用下, 浆液中自由水被强制滤过黏土, 并从泻流口流出, 使浆泡及浆脉中的浆液浓度提高。压滤效应随土体渗透性、浆液水灰比及注浆压力的增大而增强, 因此在透水性较好的土层中注浆时, 必须考虑压滤效应对浆液扩散的影响。浆液水灰比的增大将导致浆泡直径减小, 浆脉数量及长度增加, 浆脉宽度减小。在给定注浆压力下, 随着浆液水灰比的增大, 浆液的扩散方式逐渐由以压密为主向以劈裂为主过渡。黏土中劈裂注浆可分为三个阶段: 鼓泡压密阶段、第一劈裂面阶段、后续劈裂面阶段, 每个劈裂面都产生在阻力最小的面上。通过对原状萧山黏土、清水压密固结黏土及注浆后黏土进行电镜扫描观测分析得知: 在压滤效应的作用下, 水泥水化反应生成的 Ca^{2+} 离子会随着滤出液扩散到土体中, 导致黏土表面的双电层厚度变薄, 使联结更为紧密, 从而形成较坚固的团粒结构, 使土体强度提高。试验结果对注浆理论研究与应用有一定的指导意义。

关键词: 黏土注浆; 室内模拟试验; 注浆规律; 电镜扫描; 微观机理

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2009)12-1818-07

作者简介: 张忠苗(1961-)男, 浙江宁海人, 博士, 教授, 主要从事基础工程与桩基础的研究、教学、检测工作。E-mail: zjuzm@163.com。

Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay

ZHANG Zhong-miao, ZOU Jian, HE Jing-yi, WANG Hua-qiang

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Compaction grouting and fracture grouting are studied by use of a grouting simulation test device developed by the authors. The generation and development of grout balls and fractures in clay are performed by laboratory tests. The results show that pressure filtration effect exists throughout the grouting process. That is to say, free water in the grout penetrates through the clay under high pressure, so that the water-cement ratio of the grout increases. Pressure filtration effect increases with the increase of the permeability of soil, water-cement ratio of the grout and grouting pressure. So it must be taken into account when grouting in the soil has good permeability. The increase of grouting pressure will lead to the decrease of the diameter of grout balls; it also will cause the increase of the number of grout fractures and result in the decrease of the width of the grout fracture. Under certain grouting pressure, the diffusion of grout will gradually turn from the compaction grouting to the fracture grouting as the water-cement ratio increases. The fracture grouting in the clay can be divided into three stages: grout ball stage, first fracture surface stage, and following fracture surface stage. Every fracture occurs in the weakest surface. By use of the scanning electron microscope, differences among the natural clay, consolidated clay and grouting clay are analyzed. Under the effect of pressure filtration, Ca^{2+} ions can travel into the clay and improve the strength of the soil. The results are important to both the theoretical researches and the application of grouting.

Key words: grouting in clay; laboratory test; law of grouting; scanning electron microscope; meso-mechanism

0 前 言

近年来, 岩土体注浆技术得到了广泛应用, 但注浆理论研究相对落后于工程实践。室内模拟注浆试验开展很少, 且大多为渗透注浆模拟及人工致裂法劈裂

注浆模拟, 难以通过模拟注浆实现黏土中劈裂裂隙的自然产生和发展^[1-3], 因此有必要开展室内注浆模拟试

收稿日期: 2008-09-03

验。本文参照现场高压注浆系统设计开发了一种室内压力注浆模拟装置, 能够模拟各种土体的压密注浆和劈裂注浆, 且能形成完整的注浆试样。通过开展室内模拟注浆试验对黏土中注浆变化规律进行研究, 并利用扫描电镜对黏土注浆前后的细观机理进行分析。

1 试验装置与试验黏土

为了研究黏土在不同浆液水灰比、注浆压力下的注浆情况, 进而观察分析黏土中渗透注浆、压密注浆和劈裂注浆的规律, 自行设计制作了一种压力注浆室内模拟试验装置。该装置主要由空气压缩机、调压阀、压力容器、试验架和试样模具五部分构成, 如图 1、图 2 所示。

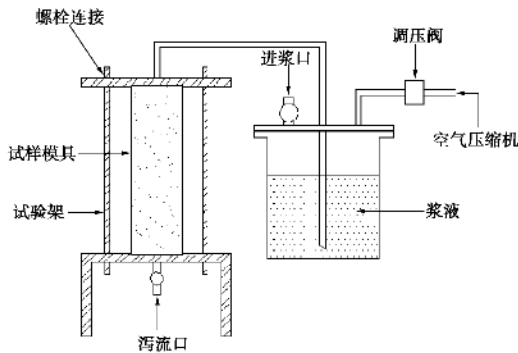


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic view of laboratory grouting test device



图 2 试验装置实图

Fig. 2 Laboratory grouting test device

1.1 空气压缩机

空气压缩机为注浆的供压设备, 它需根据试样的大小选用, 主要参数有适用压力 (MPa) 及排气量 (m^3/min)。

1.2 调压阀

调压阀用于调节气压来改变注浆压力, 将供压设备输出的气体压力控制在设定范围, 本文要求模拟注浆压力可在 0.1~1.0 MPa 可调。

1.3 压力容器

压力容器的作用是将气压转换为注浆压力。它为钢制的中空圆筒, 底端密闭, 顶端采用法兰连接, 并用橡皮圈密封。其内径为 20 cm, 壁厚为 1 cm, 高为 20 cm。顶盖开三个口, 分别为进气口、进浆口和出浆口, 其中出浆口一端伸入主体底部, 一端插入土体内部 7 cm。

1.4 试验架

试验架主要提供固定和密封作用, 通过上下两端的螺栓连接以保证试样模具的稳定及密闭性。

1.5 试样模具

试样模具为内径 10 cm、壁厚 1 cm、高 20 cm 的钢套筒。

1.6 试验装置工作机理

调压阀将空气压缩机输出的高压气体控制在一定值, 并输入压力容器。压力容器中的高压气体挤压水泥浆液, 使其通过出浆口压入土样中。同时通过控制泻流口及试验模具与试验架的连接方式来模拟不同排水条件。

1.7 试验黏土的基本物理性质

试验中使用的黏土取自萧山砖瓦厂, 称为萧山黏土, 属滨海相沉积土, 其基本物理化学性质见表 1。

2 试验步骤

首先在试样模具底部装入 5 cm 厚铁垫块, 预置注浆管空位后装入黏土并分层捣实至 14 cm 高。接着按图 1 所示将仪器装配成一个整体, 并检验其密闭性。然后将配置好的水泥浆通过进浆口倒入压力容器 (水泥浆采用 32.5R 普通硅酸盐水泥配置, 其水灰比分别为 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 每组两个试样)。最后闭合进浆口, 打开泻流口, 启动空气压缩机, 进行试验。

待注入试样的水泥初凝后, 将试样放入脱模机脱模, 接着用水泥砂浆将两端摸平, 并按规定进行养护, 以待下一步进行抗压试验或者观察浆液扩散性状, 典型注浆后试样如图 3 所示。

表 1 试验黏土的基本物理性质

Table 1 Physical properties of soil

土样	天然密度 $\rho_i (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	天然含水率 $w / \%$	比重 G_s	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_p / \%$	不同颗粒所占比例/%		
						黏粒	粉粒	砂粒
萧山黏土	1.76	41.3	2.72	52.7	26.3	57	35	8

表2 不同水灰比浆液的扩散性状

Table 2 Diffusion properties under different water-cement ratios			
水灰比 W/C	扩散方式	浆泡大小/mm	浆脉性状
0.6	压密	75	无浆脉
0.8	压密为主劈裂为辅	45	一条略微发展宽4~8 mm的浆脉
1.0	压密、劈裂相伴随	45	两条夹角为70°的浆脉,宽度分别为12~21 mm、2~4 mm
1.2	压密、劈裂相伴随	40	三条浆脉,其中两条延伸到试样边界,宽度分别为6~13 mm、4~9 mm,1条略微发展,宽度为2~3 mm
1.4	压密、劈裂相伴随	40	六条向各个方向延伸的浆脉,宽度均为2~3 mm



图3 典型注浆后试样

Fig. 3 Typical samples after grouting

3 试验结果及分析

通过对黏土中不同水灰比不同压力下注浆试验过程与注浆后试样的观测分析,得出以下试验规律:

3.1 浆液水灰比对浆液扩散性状的影响

采用不同水灰比的浆液注浆后试样的结核体形态见图4(注浆压力0.5 MPa)。

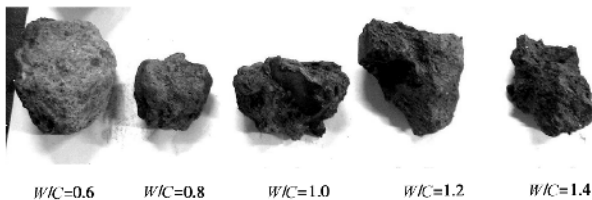


图4 不同水灰比浆液注浆后试样结核体形态

Fig. 4 Solidified grout agglomerates under different water-cement ratios

通过对试样的细观观测得出结核体中浆泡、浆脉性状如表2所示。

从图4及表2中可以看出,随着浆液水灰比从0.6逐渐增大到1.4,浆泡的大小逐渐减小,浆脉的数量及长度不断增加,而浆脉的宽度不断减小。

3.2 注浆压力对浆液扩散性状的影响

注浆压力的大小不但影响浆泡与浆脉的发展,还影响浆液的扩散形态。图5是水灰比为0.6时,不同注浆压力下,试样内的浆泡形态。从图中可以看出,随着压力的不断增大,浆泡的直径不断增大。在0.3

MPa或0.4 MPa的注浆压力下,浆液无法对土体产生劈裂。当注浆压力达到0.5 MPa时,浆液劈裂黏土体,在浆泡中心处产生了一条粗短的裂隙,由于浆液水灰比较大,该裂缝无法扩展形成完整的浆脉。可见只有注浆压力达到一定程度时(大于启劈压力)劈裂裂隙才会产生与发展。

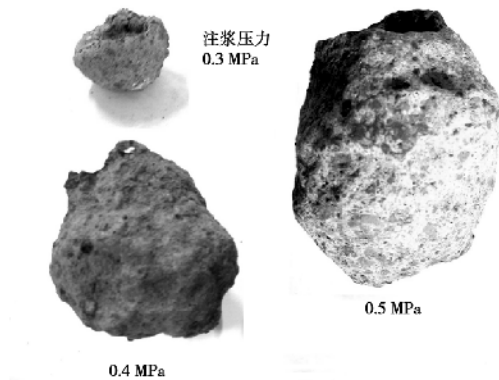


图5 不同注浆压力下的浆泡

Fig. 5 Grout balls under different grouting pressures

3.3 压滤效应

压滤效应,即在高压的作用下,浆液中自由水被强制滤过土体,使浆液浓度提高。试验观测到,注浆过程中,无论浆液在上体中以何种方式扩散,都有清水从泻流口处流出。压滤效应贯穿于整个注浆过程,其存在对浆液的扩散形态的影响不容忽视。通过对注浆结束立即脱模试样的剖切观察发现:无论是浆泡还是浆脉,其浆液的水灰比从注入的0.6~1.4,普遍降低到0.4以下。

各种水灰比水泥浆的流变曲线如图6所示^[1],从图中可以看出,水泥浆的流型与水灰比密切相关,而前人在建立注浆扩散模型时往往将“流型不变”作为一个重要假设提出,而压滤效应的存在使得在透水性较好的上层中,必须考虑压滤效应对浆液水灰比和浆液扩散性状的影响。

在试验中观测到,黏土中压滤效应主要受黏土渗透性、注浆压力和浆液水灰比的影响,黏土渗透性越大,压滤效应越显著;水灰比越大,压滤效应越显著;注浆压力越大,压滤效应越显著。

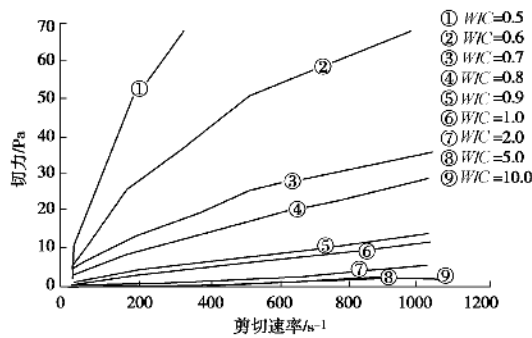


图 6 各种水灰比水泥浆的流变曲线(阮文军, 2005)

Fig. 6 Rheological behaviors of cement grouts with different water-cement ratios (Ruan Wenjun, 2005)

3.4 黏土中压密注浆的性状

当浆液水灰比较大且注浆压力小于启劈压力时, 黏土中浆液的扩散方式以压密扩散为主。从图 4 及表

2 中可以看出, 压密与劈裂这两种扩散方式并非严格区分的, 即以压密扩散为主的土样内也存在着一定的劈裂扩散, 而劈裂扩散是一个先压密后劈裂的过程。从图 7 可观察到, 在 0.5 MPa 的注浆压力下, 水灰比为 0.6 或 0.8 的水泥浆, 其扩散方式主要为压密扩散。其中, 水灰比为 0.6 的试样仅在浆泡中心产生了一条粗短的裂隙, 无法使裂隙继续扩展形成完整的浆脉(图 7 (a)), 而水灰比为 0.8 的试样产生了一条略微发展的宽 4~8 mm 的浆脉(图 7 (b))。

3.5 黏土中劈裂注浆的性状

当水灰比较大且注浆压力大于启劈压力时, 水泥浆在黏土中的扩散方式以劈裂扩散为主。根据试验观测, 劈裂扩散是一个先压密后劈裂的过程, 浆液在黏土中扩散大致可以分为三个阶段, 详见表 3。

综上所述, 水泥浆在黏土中的扩散性状见表 4。

表 3 黏土中劈裂注浆扩散过程

Table 3 Diffusion process of fracture grouting in clay

阶段	示意图	实图	描述
鼓泡压密阶段			注浆刚开始时, 注浆压力较小, 无法劈裂土体, 且土体相对松散, 浆液在注浆管口处挤压周围土体形成半球形浆泡。
第一劈裂面			随着注浆压力的不断增大, 浆泡不断增大, 直至注浆压力大于启劈压力时, 土体开始沿着最薄弱面产生裂隙。在均匀土体中劈裂面将发生在阻力最小面上, 即与小主应力垂直的平面。对于文中试样, 这个劈裂面可能为任一过浆泡中心的平面。
后续劈裂面			第一劈裂面产生后, 浆液注入第一劈裂面, 并挤压周围土体, 导致第一劈裂面周围土体不断被压缩, 强度增大。随着压力的继续提升劈裂将再次发生于阻力最小的面上, 一般情况下, 第二劈裂面将垂直于第一劈裂面。随着注浆的进行, 后续劈裂面将不断产生于土体中的软弱面, 最后形成纵横交错的浆脉, 如图 8 所示。

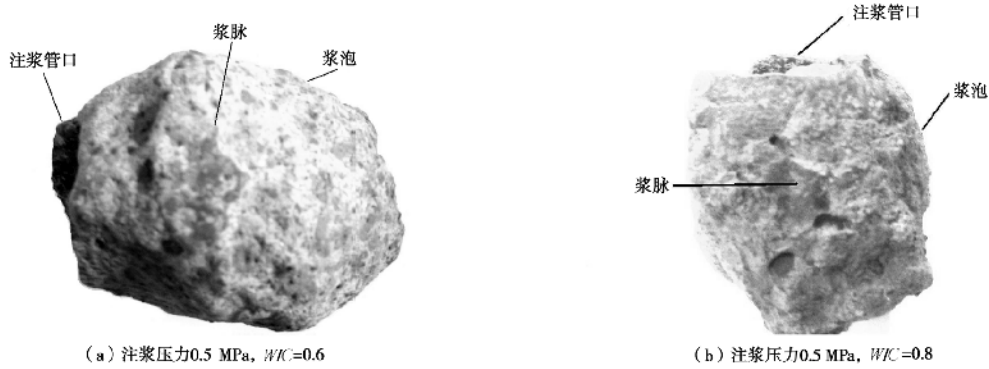


图 7 压密注浆中的浆脉

Fig. 7 Grout fracture of compaction grouting



图 8 试样纵剖面图(注浆压力 0.5 MPa, W/C=1.2)

Fig. 8 Vertical section of a sample (grouting pressure 0.5 MPa, W/C=1.2)

表 4 水泥浆在黏土中的扩散性状

Table 4 Diffusion properties of cement grouts in clay

扩散方式	发生条件	影响因素	对试样的影响
压滤	贯穿于整个注浆过程	随着土体渗透性、浆液水灰比、注浆压力的增大, 压滤效应越显著。	使浆脉、浆泡中浆液的水灰比增大, 结石体强度增大; 使浆液的启劈压力增大, 扩散距离减小; 使黏土的强度提高。
压密	注浆压力小于启劈压力且水泥颗粒无法透过土体	水灰比增大, 压密扩散减弱, 浆泡减小; 注浆压力增大, 浆泡显著增大。	在试样中心形成球形浆泡, 通过压密作用使周围土体的密实度提高。
劈裂	注浆压力大于启劈压力	注浆压力增大, 裂隙的长度和宽度增大; 水灰比增大, 启劈压力减小, 浆脉数量增多, 浆脉宽度减小。	沿着试样最薄弱面产生裂隙, 浆液进入裂隙并挤压周围土体, 提高土体密实度, 同时浆脉通过加筋效应, 提高土体强度。

4 黏土注浆前后扫描电镜分析(SEM)

为了对黏土中注浆的细观机理进行研究分析, 现对原状萧山黏土、清水压密固结黏土(0.15 MPa 压力)及本试验中注浆后黏土(浆液水灰比 0.6), 分别取粒径为 1 cm 左右的土块, 通过电子显微镜扫描进行观测对比分析。

图 9 为原状萧山黏土放大 1000 倍后的电镜照片。

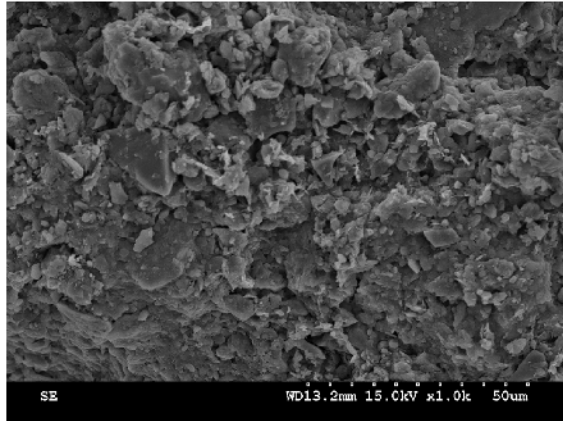


图 9 原状黏土的絮状结构

Fig. 9 Flocculent structure of natural clay

从图中可以看出, 原状黏土的断面形态为松散的絮状结构。其黏土颗粒(5 μm 以下颗粒)之间联结不紧密。

图 10 为清水压密固结黏土(0.15 MPa 压力)放大 1000 倍后的电镜照片。

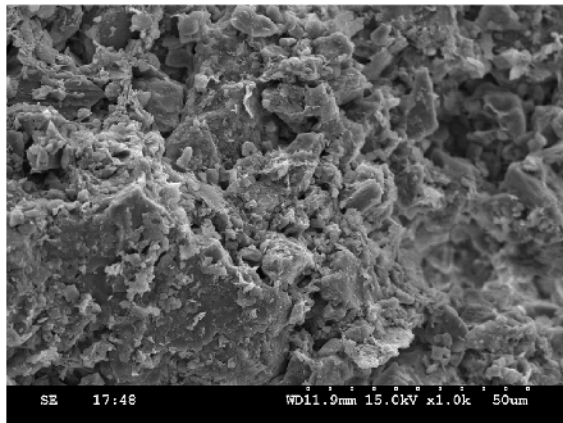


图 10 清水压密固结黏土的絮状结构

Fig. 10 Flocculent structure of consolidated clay

从上图中可以看出, 经过加压力压密固结以后, 黏土颗粒间的孔隙明显减小, 呈密实絮状结构。此时孔隙间的联结依旧不够紧密, 可以清晰地分辨大部分黏

土颗粒的形状。

图 11 为注浆后黏土(浆液水灰比 0.6)放大 600 倍后的电镜照片。

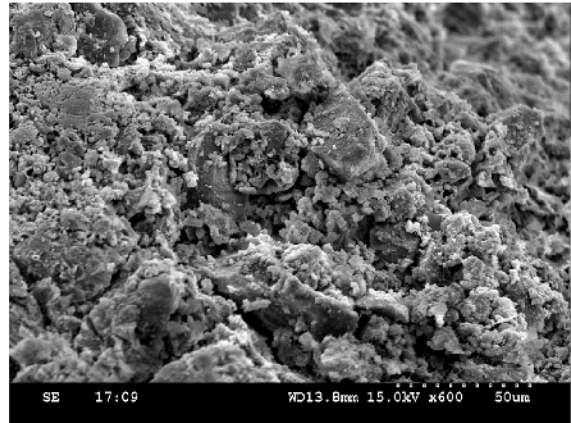


图 11 注浆后黏土的密实团状结构

Fig. 11 Agglomerate structure of grouting clay

从上图可以看出, 经过压力注浆, 原先的单独存在的黏土颗粒已团聚成为 30 μm 左右的黏土团, 使土体强度进一步提高。其原因为: 水泥水化反应生成的 Ca^{2+} 离子在压滤效应的作用下, 随着滤出液扩散到土体中, 从而导致黏土表面的双电层厚度变薄, 使土体靠的更紧密, 进而形成较坚固的团粒结构。

5 结 论

通过萧山黏土的室内注浆模拟试验及电子显微镜扫描试验得到:

(1) 开发了一种实验室模拟土体压密注浆及劈裂注浆的试验装置, 能够模拟各种土体的压力注浆过程, 且能形成完整的试样。通过试验实现了黏土中压密浆泡及劈裂裂隙的自然产生与发展。

(2) 浆液的水灰比增大, 将导致浆泡的直径减小, 浆脉的数量及长度增加, 浆脉的宽度减小。同时, 随着浆液水灰比的增大, 浆液的扩散方式逐渐由以压密为主向以劈裂为主过渡。

(3) 在黏土注浆中压滤效应时刻存在, 即在高压的作用下, 浆液中自由水被强制滤过黏土, 并从污流口流出, 使得浆泡及浆脉中浆液浓度提高。压滤效应贯穿于整个注浆过程, 且随着土体渗透性、浆液水灰比及注浆压力的增大而增强, 因此在透水性较好的土层中注浆时, 必须考虑压滤效应对浆液水灰比和浆液扩散性状的影响。

(4) 黏土中劈裂注浆可分为三个阶段: 鼓泡压密阶段、第一劈裂面阶段、后续劈裂面阶段。注浆刚开始时, 注浆压力较小, 无法劈裂土体, 且土体相对松

散,浆液在注浆管口处挤压周围土体形成半球形浆泡。随着注浆压力的不断增大,浆泡不断增大,直至注浆压力大于启劈压力时,土体开始沿着最薄弱面产生裂隙。在均匀土体中劈裂面将发生在阻力最小面上,即与小主应力垂直的平面,这个劈裂面可能为任一过浆泡中心的平面。第一劈裂面产生后,浆液注入第一劈裂面,并挤压周围土体,导致第一劈裂面周围土体不断被压缩,强度增大。随着压力的继续提升劈裂将再次发生于阻力最小的面上,一般情况下,第二劈裂面将垂直于第一劈裂面。随着注浆的进行,后续劈裂面将不断产生于土体中的软弱面,最后形成纵横交错的浆脉。

(5) 通过对原状黏土、清水压密固结黏土(0.15 MPa 压力)及本试验中注浆后黏土(浆液水灰比 0.6),分别取粒径为 1 cm 左右的土块,通过电子显微镜扫描进行观测对比分析得知:原状黏土的断面形态为松散的絮状结构,其黏土颗粒之间联结不紧密;经过清水加压压密固结以后,黏土颗粒间的孔隙明显减小,呈密实絮状结构;经过压力注浆后,原先的单独存在的黏土颗粒已团聚成为 30 μm 左右的黏土团。其原因为:水泥水化反应生成的 Ca^{2+} 离子在压滤效应的作用下,随着滤出液扩散到土体中,从而导致黏土表面的双电层厚度变薄,使土体靠的更紧密,进而形成较坚固的团粒结构,使土体强度进一步提高。

参考文献:

- [1] 葛家良, 陆士良. 注浆模拟试验及其应用研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 28 - 33. (GE Jia-liang, LU Shi-liang. Study on grouting simulation experiment and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(3): 28 - 33. (in Chinese))
- [2] 杨 坪, 唐益群, 等. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 2134 - 2138. (YANG Ping, TANG Yi-qun, et al. Study on grouting simulation experiment in sandy gravels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 2134 - 2138. (in Chinese))
- [3] 徐 润. 黏土水泥浆结石体研究[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(4): 55 - 57. (XU Run. Research on aggregated masses in clay and cement grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 32(4): 55 - 57. (in Chinese))
- [4] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 69 - 73. (RUAN Wen-jun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 69 - 73. (in Chinese))
- [5] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (The Research Group of Grouting Theories and Case Histories. The grouting theories and case histories[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [6] 张忠苗. 软土地基大直径桩受力性状与桩端注浆新技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001. (ZHANG Zhong-miao. The behaviors of big diameter piles in soft clay foundation and the new technology of grouting at piles tips[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001. (in Chinese))
- [7] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (ZHANG Zhong-miao. Pile foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese))