

文章编号:1673-2049(2017)06-0065-06

湿陷性黄土中水泥浆液注浆加固机理

周茗如^{1,2}, 陈志超¹, 罗小博¹, 周光康¹, 路承功¹

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要:通过分析湿陷性黄土的组成结构、湿陷机理、力学性能,研究了外界荷载作用下湿陷性黄土的变形及破坏机理;在湿陷黄土中做原位水泥浆液注浆加固试验,分析了注浆过程中不同时间段两者之间的相互作用;对注浆后土体纹理结构以及变形进行分析,研究了水泥浆液在湿陷性黄土中的加固机理;采用弹性力学和断裂力学进行理论计算,研究了水泥浆液与土体之间在注浆过程中的相互作用。结果表明:水泥浆液注浆对湿陷性黄土能起到有效的加固作用;湿陷性黄土注浆过程中水泥浆液造成湿陷量极小,并在压力作用下能够迅速对湿陷进行补偿;水泥浆液在黄土中的加固机理包括填充注浆、劈裂注浆、压密注浆,控制注浆压力能有效实现在湿陷性黄土中的压密注浆、劈裂注浆。

关键词:湿陷性黄土;力学特性;加固机理;注浆;水泥浆液;劈裂

中图分类号:TU472

文献标志码:A

Reinforcement Mechanism of Cement Slurry Grouting in Collapsible Loess

ZHOU Ming-ru^{1,2}, CHEN Zhi-chao¹, LUO Xiao-bo¹, ZHOU Guang-kang¹, LU Cheng-gong¹

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou

University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Western Engineering Research Center of

Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of

Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: By analyzing the structure composition, collapsibility mechanism and mechanical properties of collapsible loess, the deformation and failure mechanism of collapsible loess under external loads were studied. The in-situ cement slurry grouting reinforcement test was carried out in collapsible loess, and the interaction during grouting processes at different time was analyzed. The consolidation mechanism of cement slurry in collapsible loess was studied by analyzing the texture and deformation of soil after grouting. The interaction between cement slurry and soil during grouting was studied by means of elastic mechanics and fracture mechanics. The results show that cement slurry grouting can effectively reinforce collapsible loess. During the grouting process of collapsible loess, the collapsibility of slurry is very small, and the collapsibility can be compensated quickly under the action of pressure. The reinforcement mechanism of cement slurry in loess includes filling grouting, splitting grouting and compaction grouting, and controlling grouting pressure can effectively realize compaction and splitting grouting in collapsible loess.

Key words: collapsible loess; mechanical property; reinforcement mechanism; grouting; cement

收稿日期:2017-06-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51168031,51468039);甘肃省建设科技攻关项目(JK2014-34)

作者简介:周茗如(1962-),男,陕西凤翔人,教授,E-mail:562998591@qq.com。

slurry; separation

0 引言

水泥浆液注浆作为一种常见的地基处理方式,在砂砾、岩石、沙土地基处理过程中得到广泛应用,经尝试利用发现水泥浆液注浆对湿陷性黄土地区地基的加固以及建筑物纠偏加固中能起到快捷有效的作用,其常见注浆加固方式有填充注浆、渗透注浆、压密注浆、劈裂注浆。

湿陷性黄土^[1-2]性质极其特殊,土质均匀,结构疏松,未受水浸湿时一般强度较高,压缩性较小,一定压力下遇水浸湿后,土的结构迅速发生破坏,颗粒体积迅速收缩;由于湿陷性黄土颗粒较小,相对于沙土其空隙小且密,产生湿陷后空隙愈加减小,导致土体湿陷。

普通水泥浆液渗透要求空隙大于 0.3 mm,因此,在湿陷性黄土中注浆与在沙土、砾石中形成有很大的区别,由于水泥浆液注浆法表现出在地基加固中方便快捷、有效的特性,所以在湿陷性黄土中同样得到应用。通过分析湿陷性黄土的湿陷机理及注浆过程中的力学特性,采用原位注浆试验的方式研究水泥浆液在湿陷性黄土加固中的加固机理及水泥浆液与土体的相互作用,探究水泥浆液的扩散方式,为水泥浆液在湿陷性黄土中注浆提供有效的控制参数。

1 湿陷性黄土特性

1.1 黄土的湿陷机理

湿陷性黄土在中国分布广泛^[3],以陇东地区黄土为例,其颗粒组成如表 1 所示,陇东地区黄土的颗粒组成主要是粉土颗粒,含量(质量分数)常达 50% 以上,而黏土颗粒不多。粒径主要为 0.005~0.050 mm,黄土颗粒较小,形成的土体孔隙小,孔隙数量多。陇东地区黄土孔隙比较大(表 2),黄土土质疏松,随着年代的增加黄土孔隙比略有减小,黄土中存在较多的架空孔隙,是造成黄土发生湿陷的主要原因。在湿陷过程中,黄土中的孔隙发生明显变化,架空孔隙向支架孔隙转化。黄土在干旱半干旱条件下生成了以粗粉粒为主体骨架的结构形式^[4],在黄土颗粒间形成架空孔隙,由微小的黏土颗粒、可溶盐及腐殖质胶体等在粗粉粒接触点处形成了固化联结键,该固化联结键保证了黄土的结构强度,当黄土遇水浸湿时,由可溶盐以及黏土颗粒等组成的固化联

表 1 陇东地区黄土的颗粒组成

Tab. 1 Grain Composition of Loess in Longdong Area

粒径/mm	粒组质量分数范围/%	粒组质量分数平均值/%
>0.05	11.1~26.0	15.8
0.005~0.05	43.9~75.6	63.9
<0.005	5.5~24.7	18.0

表 2 陇东地区黄土的孔隙比

Tab. 2 Porosity Ratio of Loess in Longdong Area

年代	孔隙比 e_0	孔隙比平均值
Q ₄	1.07~1.23	1.12
Q ₃	1.03~1.16	1.09
Q ₂	0.76~1.02	0.80
Q ₁	0.95~1.20	0.96

结键发生破坏,土体承载力急剧下降,在受到外界荷载作用时迅速产生湿陷。土体中若存在空腔,在土体结构破坏时,原空腔外围土体崩塌,导致黄土大量下沉。

1.2 水泥浆液初选

水泥浆液主要采用普通硅酸盐水泥与水按一定比例混合而成,常用水灰比 $\alpha=0.5\sim2.0$,不同水灰比的水泥浆液有不同的特性; $\alpha=0.5\sim0.7$ 时水泥浆液为幂流体水泥浆液; $\alpha=0.8\sim1.0$ 时水泥浆液为宾汉流体水泥浆液; $\alpha>2.0$ 时水泥浆液为牛顿流体水泥浆液,其剪切特性与另外 2 种有明显的区别,幂流体剪切应力 $T=ky^n$ (k 为稠度系数, n 为流性指数, y 为变形速率);牛顿流体剪切应力与变形速率成正比;宾汉流体剪切力超过某值时发生剪切变形且变形速率呈线性变化。

由于黄土孔隙小,且土质疏松,为增强水泥浆液对土体的挤密作用,宜选用宾汉流体水泥浆液作为黄土注浆加固。黄土具有较强吸水性,水泥浆液进入土体水分遗失,其含水量迅速降低,水泥浆液水灰比减小,稠度增大,在后期产生劈裂时水泥浆液流变性减小,因此选用 $\alpha=0.8\sim1.0$ 的水泥浆液进行黄土注浆加固试验。

2 水泥浆液在湿陷性黄土中扩散机理

在原位注浆试验中,注浆孔采用机械成孔的方式(图 1),孔径 48 mm,采用水灰比 $\alpha=0.8$ 的普通水泥浆液。1~3 号孔采用机械成孔后放入端头滚丝花管,距地面 30 cm 范围内采用织物以及素土捣实之后进行注浆;4 号孔使用传统橡皮塞封口注浆。

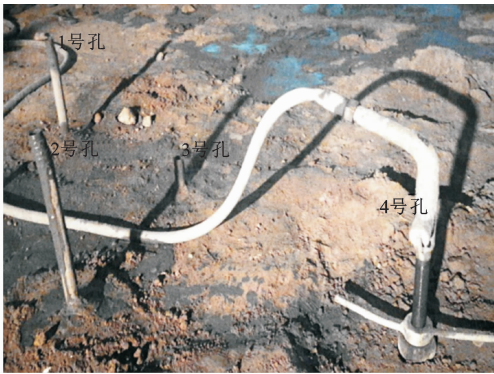


图 1 机械成孔

Fig. 1 Mechanical Drilling

不同注浆方式及不同位置其压力变化见图 2。

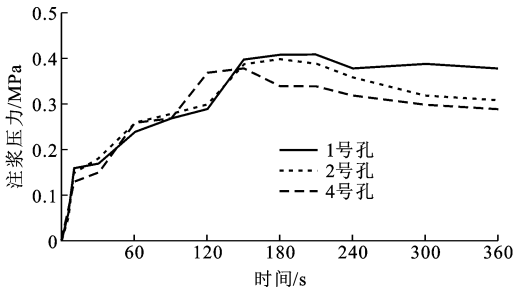


图 2 注浆压力 P 随时间 t 的变化

Fig. 2 Changes of Grouting Pressure P with Time t

1 号孔未出现冒浆现象,持续性注浆,7 min 后仍未出现变化,停止注浆;2 号孔注浆达到 5 min 左右时,水泥浆液从 3 号孔冒出;4 号孔在注浆达到 3 min 时,橡皮塞充起,开始少量喷浆,逐渐喷出水泥浆液增多,水泥浆液外漏。水泥浆液固结后,对其进行开挖观察,1,2 号注浆孔形成的扩展浆脉多,并且浆脉宽度大,脉路长,4 号孔只出现相对较为短小的浆脉,且在孔洞处形成的水泥柱直径相对较小。

从图 2 可以看出,采用封口花管注浆方式产生的注浆压力明显大于传统橡皮塞封口注浆方式。注浆过程中压力变化可分为 3 个阶段^[5]:第 1 阶段,注浆初始,压力迅速增大,达到 0.15 MPa 左右出现短时间稳压,此阶段为水泥浆液进入管道,由于管道对水泥浆液的摩阻力使注浆压力迅速从 0 开始增大;第 2 阶段,注浆压力逐渐缓慢增加,最后达到一个峰值,此阶段水泥浆液逐渐进入孔洞,首先对孔洞内部进行填充,由于是封闭空间,内部气压增大,随着水泥浆液的进入不断挤压孔壁土体,黄土被挤压,孔径变大,土体逐渐开裂,在压力作用下产生劈裂注浆;第 3 阶段,注浆压力开始下降,之后压力出现稳定浮动,水泥浆液在黄土中发生劈裂后,后续劈裂所需压力相对减小,出现漏浆以及串孔使注浆压力急剧

减小。

2.1 水泥浆液与孔内土体接触

第 1 阶段水泥浆液在压力作用下灌入机械成孔土体中,水泥浆液没有产生渗透(图 3)。原因分析如下:①普通水泥浆液渗透要求空隙大于 0.3 mm,由表 1 可知黄土中粒径小于等于 0.05 mm 的颗粒质量分数平均值为 81.9%,且黄土孔隙比在 1.0 上下浮动(表 2),因此黄土颗粒间空隙极小且密,很难产生渗透作用;②水泥浆液中水使孔壁土体迅速产生湿陷,空隙减小,进一步阻止渗透产生。



图 3 固结水泥柱扩粗图

Fig. 3 Consolidated Cement Column Expanding Figure

2.2 水泥浆液与土体间挤压作用

第 2 阶段水泥浆液在压力作用下与孔壁土体之间产生挤压作用,注浆压力快速增加。由于在第 1 阶段未产生渗透,如若不考虑压力作用下水对黄土的影响,可计算出各水平位置的附加应力,如图 4 所示,其中, X 为到孔边缘的水平距离, a 为注浆孔半径, b 为土体中某一位置距注浆孔中心的距离。由于力在土中传播时随深度增加逐渐减小,当某一位置压力 P_1 ($P_1 = \alpha' P$, α' 为应力系数)等于侧向土压力 σ 时土体受力平衡,土体不再被压缩。在这里引入分层总和法地基沉降量计算方法^[6],取宽度为 1 的条形面积,经过简化可得在压力作用下各水平位置产生的应力系数 α' ,如表 3 所示,其余值线性内插。 $\alpha' = \sigma / P$,以此通过测定黄土侧向土压力来确定黄土中注浆时压力作用范围,设计施工时可以有效控制孔洞间距。

注浆过程中,水泥浆液中水对湿陷性黄土的影响不得不考虑,通过对陇东地区马兰黄土湿陷性系数的测定,马兰黄土在 5 m 深度内湿陷性强烈,5 m 深度以下湿陷性轻微到中等,湿陷系数的峰值压力为 300~400 kPa,注浆压力足以引起周边黄土湿陷,

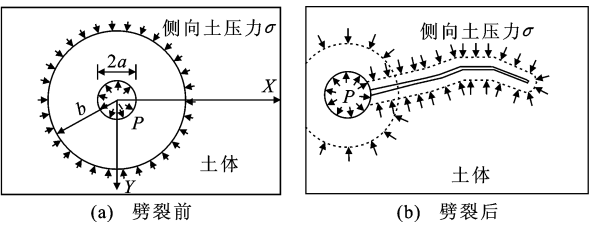


图 4 土体劈裂前后受力示意

Fig. 4 Schematic Diagram of Soil Force Before and After Separation

压力作用下水泥浆液中水对黄土进行渗透,水含量的增加使得土颗粒间固化联结键破坏,强度下降,压

力作用下发生加大变形,如图 3 所示,水泥浆液形成的柱呈现扩大增粗的趋势,由原先的 90 mm 孔径扩大至 150~200 mm。黄土产生的微量湿陷被高压水泥浆液迅速填充,当含水量不超过其最优含水率时,引起的适量湿陷可增加土体密实度。

2.3 水泥浆液在湿陷性黄土中劈裂

2.3.1 初始劈裂

随着注浆压力的增大,土体所受压力增加,注浆到第 3 阶段,在一些薄弱区域首先产生劈裂。根据弹性理论取单位深度土体进行分析,其为半径分别为 a, b 的轴对称平面问题^[7-8],极坐标下的平面应

表 3 水平位置应力系数

Tab. 3 Horizontal Stress Coefficient

X/m	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
α'	1.000	0.959	0.818	0.668	0.550	0.462	0.396	0.345	0.306	0.208	0.158	0.126	0.106

力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{B}{r^2} + 2C \\ \sigma_\theta &= -\frac{B}{r^2} + 2C \\ \tau_{r\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: B, C 为任意常数; $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ 为极坐标下的应力; r 为应力作用半径。

式(1)的应力边界条件为

$$\left. \begin{aligned} r=a, \sigma_r &= -P, \tau_{r\theta}=0 \\ r=b, \sigma_r &= -\sigma, \tau_{r\theta}=0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中可以得到

$$B = \frac{-a^2 b^2 (P + \sigma)}{b^2 - a^2}, 2C = \frac{Pa^2 + \sigma b^2}{b^2 - a^2} \quad (3)$$

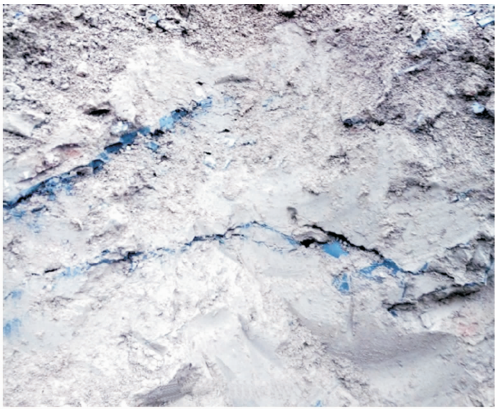
再将式(3)代入式(1)可以推出

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{-a^2 b^2 (P + \sigma)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + \frac{Pa^2 + \sigma b^2}{b^2 - a^2} \\ \sigma_\theta &= \frac{a^2 b^2 (P + \sigma)}{b^2 - a^2} \frac{1}{r^2} + \frac{Pa^2 + \sigma b^2}{b^2 - a^2} \\ \tau_{r\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由式(4)得到沿孔壁方向应力 σ_θ , 记土体在压力作用下遇水湿陷后土颗粒之间抗拉强度为 σ_t , 则当 $\sigma_\theta \geq \sigma_t$, 即 $\frac{b^2 (P + \sigma)}{b^2 - a^2} + \frac{Pa^2 + \sigma b^2}{b^2 - a^2} \geq \sigma_t$ 时孔壁发生劈裂, 由于孔壁不同位置土颗粒间抗拉强度大小不一, 因此首先在抗拉强度较小处产生劈裂, 此时 $P \geq \frac{(b^2 - a^2) \sigma_t - 2b^2 \sigma}{a^2 + b^2}$ 。劈裂后水泥浆液对土体持续性

2.3.2 劈裂后水泥浆液扩展

黄土被劈裂后,水泥浆液形成了新的浆脉,因土体强度以及颗粒组成不同,形成不同形式浆脉,大致可分为水平扩展浆脉和竖向扩展浆脉,如图 5 所示。



(a) 水平扩展浆脉



(b) 竖向扩展浆脉

图 5 不同方向扩展浆脉

Fig. 5 Slurry Vein in Different Directions

从图 5 可以看出,水平扩展浆脉明显比竖向扩

展浆脉小,这是由于土体在沉积过程中竖向土压力要大于土的侧向土压力,因此在劈裂过程中易形成竖向扩展浆脉。水平扩展浆脉多出现在深度较浅的土体中,由于水平扩展水泥浆液灌入量少,产生的劈裂强度小,从而形成的水平扩展浆脉薄。

由断裂力学可知,裂隙扩展压力为

$$P=\frac{G(l/a)}{F(l/a)}\sigma_3+[1-\frac{G(l/a)}{F(l/a)}]\sigma_1+\frac{K_1}{F(l/a)/\sqrt{\pi l}} \quad (5)$$

式中: l 为裂隙长度; K_1 为裂隙扩展时临界强度因子; σ_1 为竖向土压力; σ_3 为侧向土压力; $G(l/a)$, $F(l/a)$ 均为 l/a 的函数。

由于裂隙扩展长度相对孔洞半径大,当 $l\geq 10a$ 时, $G(l/a)=F(l/a)=1$,此时扩展压力 P 可简化为 $P=\sigma_3+\frac{K_1}{\sqrt{\pi l}}$,推出 $l=\frac{K_1^2}{\pi(P-\sigma_3)^2}$,由此得出裂隙长度由侧向土压力 σ_3 及注浆压力 P 控制,注浆过程中水泥浆液时变性以及在裂隙中流动会造成能量的损失,随长度的增加,产生的实时压力减小,由公式 $l=\frac{K_1^2}{\pi(P-\sigma_3)^2}$ 可知,当 $P=\sigma_3$ 时裂隙长度 l 趋于无限长。

劈裂瞬间形成的土体裂缝决定了劈裂后浆脉的截面特征,由公式 $P\geq \frac{(b^2-a^2)\sigma_t-2b^2\sigma}{a^2+b^2}$ 可知,在相同侧向土压力下土颗粒间的抗拉强度 σ_t 越小,土体产生劈裂所需力越小, σ_t 的大小与其所处位置深度以及周边土体对其作用有关。劈裂后浆脉的扩展除了浆脉走向的扩展还有垂直浆脉方向的扩展^[9],形成了如图 6 所示鱼肚形浆脉截面,且在 A,B 位置出现应力集中,在 x 轴方向浆脉更易扩展。土体垂直方向主要受上部土体自重限制,埋深越大产生劈裂的可能性越小,形成的浆脉越薄;水平方向主要受侧向土压力的限制,侧向土压力越大,形成的浆脉越薄。

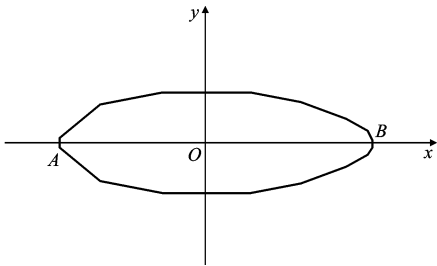


图 6 浆脉截面示意

Fig. 6 Sketch of Cross Section of Slurry Vein

2.4 水泥浆液填充加固

水泥浆液对土体中缺陷的填充虽然在试验中未

出现此等现象,但在实际工程中是比较常见的,尤其是既有建筑地基加固中,一类是由于上部一定厚度土体在建筑物自重作用下已固结,下部土体受外界干扰或者水下渗,局部位置产生空腔;另一类是土体下陷,建筑物存在较大刚度时,土体与建筑物分离。注浆过程中,水泥浆液遇到空腔及空隙时将会持续灌入填充,直至填满,固结形成结石体,地基承载力得到有效加固(图 7)。水泥浆液对地基地部空隙填充,由于上部建筑物对土体产生的附加荷载远大于侧向土压力,因此在注浆加固过程中不会对建筑物造成过大的影响。相对于灰土挤密桩法加固地基,水泥浆液注浆加固能够快速有效实现地基承载力的提升,并且对既有建筑物影响较小。



图 7 水泥浆液填充基础底部空隙效果图

Fig. 7 Effect Picture of Cement Slurry to Fill Gap at Bottom of Base

水泥浆液注浆经过挤密、劈裂、填充,既对土体起到骨架及挤密作用,又对土体内部缺陷进行了填充,对地基土进行了有效补强。

3 工程实例

工程位于宁夏同心县,该地区土质为典型湿陷性黄土,工程中采用水泥浆液注浆法对 2 层办公楼地基进行了加固,办公楼由于管道泄漏以及长期雨水下渗,导致地基土湿陷,房屋基础产生不均匀沉降。房屋在修筑时采用 3 : 7 灰土对地基土进行夯实处理,湿陷后在灰土层以下形成空腔,房心土以及地基回填土渗水后湿陷,地板下陷开裂。

注浆过程采用分步注浆,第 1 步对地基土进行注浆,在建筑物四周布注浆孔进行深孔注浆,注浆过程中吃浆量较大且后期水泥浆液从灰土层裂缝中流出,填充灰土层与基础间空隙;第 2 步对房心土进行注浆,注浆过程中由于该土湿度大,并已产生湿陷,吃浆量仍然较大。

采用水泥浆液注浆加固过程中,对建筑物进行沉降观测,发现在注浆过程中建筑物未发生任何变

化,注浆后原有的沉降得到有效遏制。各观测点沉降量见表 4。

表 4 各观测点沉降量变化

Tab. 4 Settlement Changes of Each Observation Point

观测点编号		XZZX-01-01	XZZX-01-02	XZZX-01-03	XZZX-01-04	XZZX-01-05	XZZX-01-06
注浆前沉降量/mm	72 h	40	68	191	189	275	332
	1 h	42	73	195	193	284	346
注浆后沉降量/mm	3 h	43	73	195	194	285	348
	24 h	44	75	196	196	287	349
	72 h	44	75	196	196	287	349

4 结 语

(1)水泥浆液在湿陷性黄土中注浆能起到有效加固作用,并且在注浆过程中对既有建筑物影响较小,尤其采用花管注浆方式能进一步提升注浆效果。

(2)湿陷性黄土注浆过程中水泥浆液造成湿陷量极小并在压力作用下能够迅速对湿陷进行补偿,不过为防止水泥浆液引起黄土含水率过高甚至达到液限,需根据黄土含水率控制水泥浆液水灰比,水泥浆液水灰比不宜超过 1.0。

(3)对于采用灰土地基的既有建筑,水泥浆液注浆可起到快速便捷的加固,通过分析其受力形式,水泥浆液在黄土中的加固机理包括填充注浆、劈裂注浆、压密注浆。确定土体侧向土压力的基础上控制注浆压力,能有效实现在湿陷性黄土中的压密、劈裂注浆。

(4)由于湿陷性黄土颗粒小,空隙多而密,因此水泥浆液形成劈裂较难,注浆形成劈裂浆脉数量少,导致水泥浆液作用范围减小,所以在注浆工艺上还需要加以改进,使黄土在注浆过程中出现大量劈裂,提升其注浆加固效果。

参考文献:

References:

[1] 王永焱,林在贯.中国黄土的结构特征及物理力学性质[M].北京:科学出版社,1990.
WANG Yong-yan,LIN Zai-guan. Structural Characteristics and Mechanical Properties of Chinese Loess[M]. Beijing:Science Press,1990.

[2] 覃小华,黄雪峰,姚志华,等.基于侧限压缩下非饱和黄土结构特性试验研究[J].工程勘察,2012(10):16-21.
QIN Xiao-hua,HUANG Xue-feng,YAO Zhi-hua, et al. Experimental Study on Structural Properties of Unsaturated Loess Based on Soil Confined Compression[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2012 (10):16-21.

[3] 刘海松,倪万魁,颜 斌,等.黄土结构强度与湿陷性的

关系初探[J].岩土力学,2008,29(3):722-726.

LIU Hai-song,NI Wan-kui,YAN Bin,et al. Discussion on Relationship Between Structural Strength and Collapsibility of Loess[J]. Rock and Soil Mechanics,2008, 29(3):722-726.

[4] 方祥位,欧益希,李春海,等.浸湿对原状 Q₂ 黄土微观结构与力学性质的影响研究[J].岩土力学,2015,36 (增2):111-117.

FANG Xiang-wei,OU Yi-xi,LI Chun-hai, et al. Research on Influence of Soaking on Microstructure and Mechanical Behavior of Q₂ Loess[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(S2):111-117.

[5] 阮文军.基于浆液粘度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J].岩土力学与工程学报,2005,24(15):2709-2714.

RUAN Wen-jun. Spreading Model of Grouting in Rock Mass Fissures Based on Time-dependent Behavior of Viscosity of Cement-based Grouts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (15): 2709-2714.

[6] 张克恭,刘松玉.土力学[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2010.

ZHANG Ke-gong,LIU Song-yu. Soil Mechanics[M]. 3rd ed. Beijing:China Architecture & Building Press, 2010.

[7] 米海珍.弹性力学[M].北京:清华大学出版社,2013.

MI Hai-zhen. Elastic Mechanics[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2013.

[8] 黄明利,管晓明,吕奇峰.基于弹性力学的诱导劈裂注浆机制分析[J].岩土力学,2013,34(7):2059-2064.

HUANG Ming-li, GUAN Xiao-ming, LU Qi-feng. Mechanism Analysis of Induced Fracture Grouting Based on Elasticity[J]. Rock and Soil Mechanics,2013, 34(7):2059-2064.

[9] 陈存礼,何军芳,杨 鹏.考虑结构性影响的原状黄土本构关系[J].岩土力学,2007,28(11):2284-2290.

CHEN Cun-li,HE Jun-fang,YANG Peng. Constitutive Relationship of Intact Loess Considering Structural Effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (11): 2284-2290.