

水玻璃自渗注浆加固原状黄土效果及评价

金鑫¹, 王铁行¹, 于康康^{1,2}, 罗扬¹, 左腾飞³

(1.西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2.郑州中核岩土工程有限公司, 河南, 郑州 450003;

3.长庆油田分公司第六采气厂, 陕西, 延安 716000)

摘要:针对原状黄土具有大孔隙的特点,对水玻璃自渗注浆加固原状黄土的可行性及加固效果进行研究.通过现场注浆试验,探究了水玻璃自渗注浆加固原状黄土的可行性并初步确定了加固影响范围.通过强度及水稳性试验,发现经自渗注浆加固后的原状黄土强度高、水稳性好.通过室内自渗注浆模型试验,发现自渗注浆半径随土体含水量的增大而减小,随土体孔隙比的增大而增大.对密度、含水量相同的原状黄土和重塑黄土分别进行水玻璃自渗注浆加固,试验结果表明,加固后原状黄土强度远大于重塑土,说明原状土原有的结构及贯通的大孔隙有利于提高自渗注浆效果.室内外试验结果表明,原状黄土经水玻璃自渗注浆加固后其强度和抗变形能力均大幅提高.运用渗流力学推导出自渗注浆柱形扩散公式,在可接受范围内,注浆半径和注浆量其理论计算值与实测值之间的差异分别约为 25%和 40%.

关键词:原状黄土;大孔隙;水玻璃;自渗注浆;无侧限抗压强度;水稳性;柱形扩散

中图分类号: TU 444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)04-0516-06

Effect assessment of sodium silicate self-permeated grouting in intact loess

JIN Xin, WANG Tiehang, YU Kangkang, LUO Yang, ZUO Tengfei

(College of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055)

Abstract: Studies in the feasibility and reinforced effect of sodium silicate self-permeated grouting in loess area have been carried out on the basis of intact loess's macropore characteristic. The reach of grouting and its feasibility can be acquired via field grouting test. Through unconfined compressive strength and water stability test, the intact loess strength and water stability are well improved. From the laboratory self-permeated grouting model test, the grouting radius decreases with the increase of loess water content and increases with the increase of void ratio. Under the condition of the same void ratio and near water content, the intact loess strength is far greater than structureless loess which shows that intact loess macropore contributes to the effect of self-permeated grouting. Laboratory and field test results show that reinforced intact loess has excellent strength and anti-deformability. Columnar diffusion equations for self-permeated grouting were established through mechanics of fluids in porous media. Within the acceptable range, the grouting radius and amount from field test had respectively differences about 25% and 40% to the calculated values with the proposed equation.

Key words: intact loess; macropore; sodium silicate; self-permeated grouting; unconfined compressive strength; water stability; columnar diffusion

硅化法既可用于既有建筑物的地基加固,也可用于新建工程的地基处理,国内外工程应用较多,但硅化法在黄土地区应用较少^[1-2].硅化法在黄土地区现有的工程应用基本上参照其它地区经验,采用压力注浆,需要压力设备^[3-6],成本较高.考虑到原状黄土具有大孔隙结构,利用这一特点若能进行自渗注浆,将极大地提高施工的便利性和经济性,因此,针对目前研究状况并结合黄土大孔隙性的特点,通过现场注浆、室内强度、水稳性及自渗注浆模型等试验,研究水玻璃自渗注浆加固原状黄土的效果及规律并通过渗流力学推导了自渗注浆柱形扩散公式,为原状黄土加固提供参考.

1 现场注浆试验

1.1 试验场地及材料

试验场地位于陕西省彬县,场地地貌单元为黄土塬.试验用黄土物理、力学性质见表 1,试验用水玻璃参数见表 2.

表 1 试验黄土的物理、力学性质指标平均值

Tab. 1 Average values of loess's physical and mechanical properties

地 层	含水量 $\omega/\%$	干重度 $\gamma_d/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	孔隙比 e_0	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$
Q ₃	13.7	12.9	1.1	27.7	20.7

表 2 试验用水玻璃主要技术指标

Tab. 2 Parameters of sodium silicate

浓度 /Be	密度 /g·cm ⁻³	Na ₂ O 含量 /%	SiO ₂ 含量 /%	模数 /m
40	1.38	9.32	27.95	3.0

收稿日期: 2015-11-20 修改稿日期: 2016-08-15

基金项目: 陕西省自然科学基金(2014JM7298)资助; 西安建筑科技大学人才基金(DB01158)资助

作者简介: 金鑫(1988-),男,博士生.主要从事湿陷性黄土地区复合地基等方面研究工作. Email: 718912147@qq.com

自渗注浆时,注浆孔深度越大,孔内静压越大,有可能对注浆效果产生影响,为了反映这一因素,选取三个注浆深度进行试验研究,每一深度设 4 个平行孔,注浆孔平面布置见图 1,孔深见表 3。

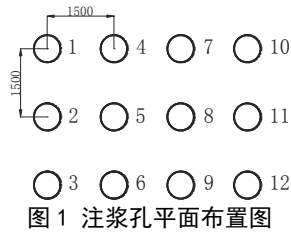


图 1 注浆孔平面布置图

Fig. 1 Layout plan of grouting holes

表 3 注浆孔深度
Tab. 3 Depth of grouting holes

注浆孔编号	孔深/cm
1~4	80
5~8	100
9~12	120

将注浆管依次放入注浆孔内,进行溶液自渗注浆,当有返浆现象时,注浆停止,拔出注浆管,将注浆孔封闭并进行标记,记录单孔注浆时间以及注浆量。

1.2 现场试验结果及分析

将注浆加固后的黄土进行为期 30 d 的天然养护,然后进行开挖,观察发现加固体基本呈圆柱状,直径约为 25 cm,土体原有结构保存完整,浆液填充土体孔隙效果显著。

根据对注浆时间与注浆量的记录,得出注浆孔深分别为 80 cm、100 cm、120 cm 时,注浆量与注浆时间的关系。

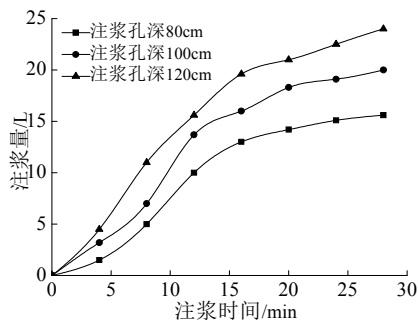


图 2 原状土不同注浆孔深注浆量随注浆时间的变化

Fig. 2 Curves of grouting amount and time

由图 2 可看出,对同一深度的注浆孔,注浆量随注浆时间的增长逐渐增大,注浆速率随时间的增长逐渐减小,孔深为 80 cm 的注浆孔,单孔注浆平均速率由起初的 0.8 L/min 最后下降为 0.2 L/min,单孔注浆量平均为 15.6 L. 主要原因是当注浆开始时,水玻璃中的凝胶物质逐步充填黄土中的部分孔隙,随着注浆的持续进行,注入黄土的凝胶物质逐渐增多,在浆液的影响范围内,黄土的孔隙进一步被浆

液中的胶结物质充填,导致注浆速率下降. 并且随着注浆孔深度的增加,注浆量增大,主要原因是孔深越大,在注浆孔内积聚的浆液越多,静压越大单孔注浆量相应增大. 说明水玻璃加固黄土自渗注浆量对压力比较敏感,由于黄土具有大孔结构,随着孔深增大,注浆浆体的静压力增加,虽然试验孔深增大产生的静压力值并不大,但注浆量明显增加。

2 加固体的强度及水稳性试验

2.1 强度试验

将现场取回的加固体进行分割并标记,制成高 80 mm,直径 39.1 mm 的圆柱形试样,进行无侧限抗压强度试验^[7-9]。

对孔深均为 80 cm 的注浆孔,分别取距地面 80cm、100 cm、120 cm、140 cm 处圆柱加固体中心土样和同一深度处的原状土样进行无侧限抗压强度试验,结果如下。

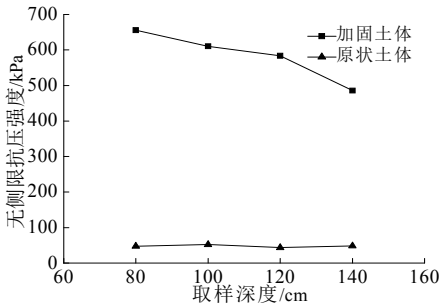


图 3 不同取样深度的原状加固土体强度变化趋势

Fig. 3 Reinforced intact loess's strength variation trend of different depth

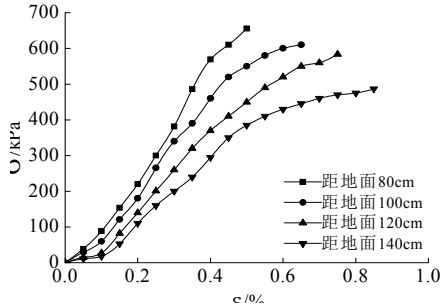


图 4 不同深度处原状加固土体无侧限抗压强度曲线

Fig. 4 Curves of reinforced intact loess's unconfined compressive strength of different depth

由图 3 和图 4 可以看出,经水玻璃 (Na_2SiO_3) 自渗注浆加固后的原状黄土无侧限抗压强度大幅提高,是天然黄土的平均 10 倍以上,加固效果显著,自注浆中心(深度 80 cm)向下,注浆加固体的强度逐渐减小. 随着注浆的进行浆液中的胶结物质逐渐充填注浆孔周围黄土中的孔隙,使黄土的渗透能力下降,浆液在重力的作用下,向下的渗透范围有限,所以加固后的黄土随着取样深度的增加,其强度有所下降。

进一步针对深度为 100 cm 的加固体平面,取距注浆中心分别为 0 cm、7.5 cm、15 cm、22.5 cm 的加固土样进行无侧限抗压强度试验,试验结果如图 5-6 所示。

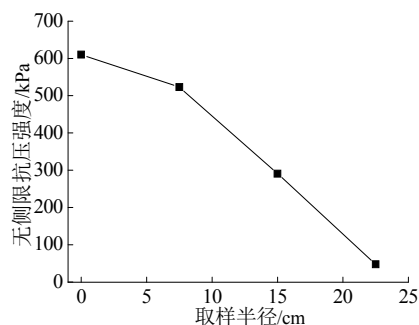


图 5 不同取样半径的原状加固土体强度变化趋势

Fig. 5 Reinforced intact loess's strength variation trend of different radius

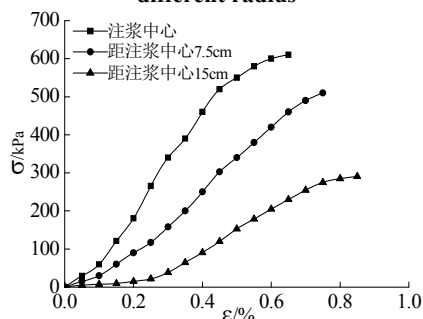


图 6 同一深度不同半径原状加固土体无侧限抗压强度曲线

Fig. 6 Curves of reinforced intact loess's unconfined compressive strength at the same depth of different radius

由图 5 可以看出,沿注浆中心的径向方向,随着取样半径增加,注浆加固体强度减小,当取样半径为 22.5 cm 时,强度下降显著。由于采用自渗注浆,浆液在水平方向不受外力作用,随着注浆的进行,注浆孔周围黄土水平方向的孔隙被浆液中的胶结物质所充填,使浆液在水平方向渗透受到限制,超过其水平渗透范围的土体未受浆液加固。

对比图 5 和图 6,注浆下渗加固范围明显大于水平加固范围,现场实测表明,下渗加固深度约为圆柱半径的 5 倍。由于浆液所受的液体静压力和重力对其竖直方向的渗透起促进作用,使其在竖向的自渗能力大于水平方向,并且加固土体强度越大,在相同应力水平下的应变越小,抗变形能力越强。

2.2 水稳定性试验

由于黄土颗粒间可溶盐胶结强度低,当黄土作为路基或建筑地基时容易发生透水和失稳现象,有必要对加固土体的水稳性进行试验。

分别将取距地面 80 cm、100 cm 的加固土样,完全浸没于蒸馏水中,60 d 后对浸水后的土体进行无侧限抗压强度试验^[9-10],结果如图 7 所示。

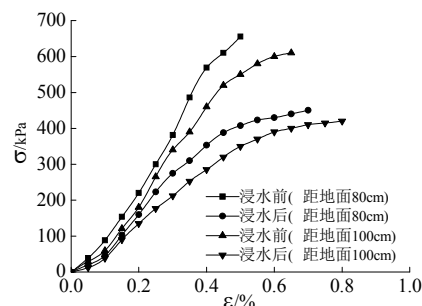


图 7 原状加固土体浸水前后无侧限抗压强度对比曲线

Fig. 7 Contrast curves of reinforced intact loess's unconfined compressive strength of immersed and non-immersed

由图 7 可以看出,浸水后加固体强度较浸水前平均下降 28%,但其强度仍是天然黄土的 6 倍以上。

加固体受水浸泡强度降低一方面是因为黄土中未受水玻璃加固的土体遇水后,其中的易溶盐溶解削弱了土颗粒间的连结强度。另一方面是在浸水环境中,硅酸凝胶的脱水缩合作用减缓,使其凝胶强度增长缓慢。

黄土经水玻璃自渗注浆加固后具有良好的水稳定性是因为黄土中的易溶盐 MgSO_4 、 Na_2CO_3 、 KCl 、 NaCl 、 MgCl_2 、 CaCl_2 等,其中析出的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与水玻璃中的 SiO_3^{2-} 产生互换的化学反应,生成难溶性的硅酸钙(镁)凝胶,不仅充填了黄土中的孔隙,并且生成的凝胶薄膜包裹土颗粒,增加了粒间的胶结力,使土体硬化且具有足够的坚固性、水稳性^[11-15]。

3 室内自渗注浆模拟试验

由于现场试验场地含水量及孔隙的不均匀性,为更好地研究自渗注浆规律,进行室内黄土自渗注浆模拟试验。

将取自现场未经加固的土体,经过风干、研磨,过 2 mm 筛后,用蒸馏水分别将土样配制成孔隙比均为 1,含水量分别为 12%、15%、18%、21%、24% 的试验土样(其中对含水量为 12%、15%、18%、21% 的土样再分别配置相应含水量下孔隙比分别为 0.9 和 1.1 的土样)将配制好的土样装入体积为 40cm×40cm×40cm 的试验箱。

选用与现场参数相同水玻璃浆液进行自渗注浆模拟试验,标准养护 30 d 后,试验结果如下。

图 8 和图 9 显示出,在相同孔隙比条件下自渗加固半径随着土体含水量的增大而减小,注浆加固体强度也随含水量增大而减小,当含水量大于 20% 时,强度下降显著。

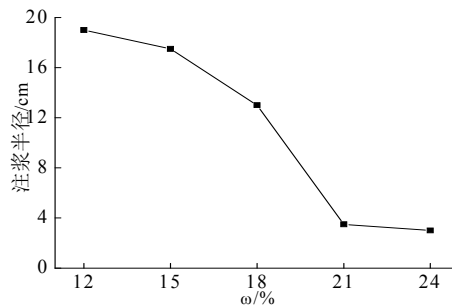


图 8 自渗注浆半径随含水量变化趋势

Fig. 8 Self-permeated grouting radius variation trend of different water content

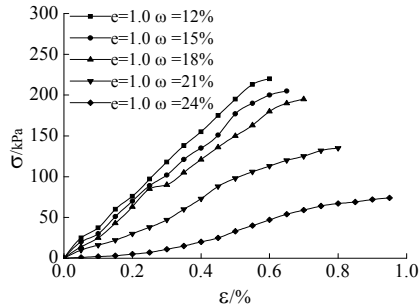


图 9 重塑加固土体无侧限抗压强度随含水量变化对比曲线

Fig. 9 Contrast curves of reinforced structureless loess's unconfined compressive strength of different water content

图 8 和图 9 显示出,在相同孔隙比条件下自渗加固半径随着土体含水量的增大而减小,注浆加固体强度也随含水量增大而减小,当含水量大于 20% 时,强度下降显著。

由于土体含水量的增大使土体孔隙大量充水,含水孔隙不能被浆液填充并且孔隙水阻碍了浆液在孔隙间的流动,使水玻璃对土颗粒的胶结作用减弱。同时含水量的提高会减缓硅酸凝胶的脱水缩合作用,使硅酸凝胶强度增长缓慢。

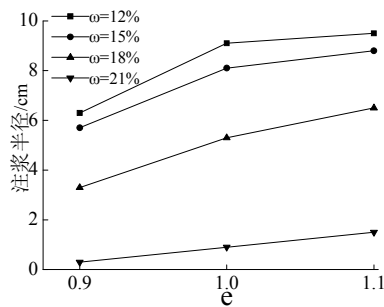


图 10 重塑土自渗注浆半径随孔隙率变化趋势

Fig. 10 Structureless loess's self-permeated grouting radius variation trend of different void ratio

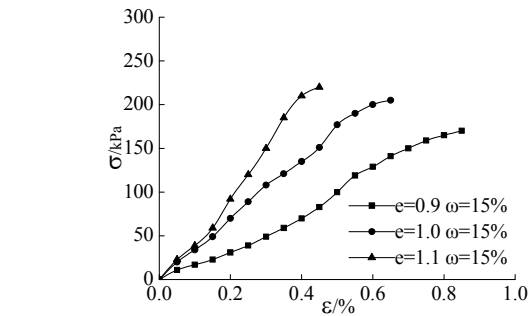
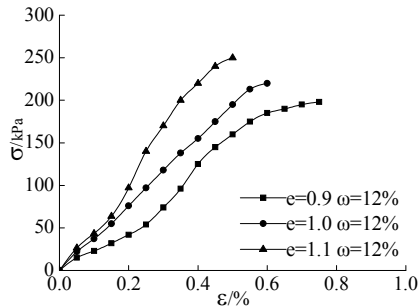


图 11 重塑加固土体无侧限抗压强度随孔隙比变化对比曲线

Fig. 11 Contrast curves of reinforced structureless loess's unconfined compressive strength of different void ratio

由图 10 可以看出,在相同含水量条件下随着土体孔隙比的增大,注浆加固半径逐渐增大。由于土体孔隙比的增大,土颗粒间的联结紧密程度降低,土颗粒对浆液的阻碍作用减小,使浆液自渗范围增大。

图 11 给出了重塑加固土样强度试验结果,揭示出当土体含水量相同时,随着孔隙比增大,加固体强度增大。由于孔隙增大,浆液入渗土体效果显著,浆液包裹土颗粒更充分,增强了颗粒间的连结能力,使土体强度增大。

将重塑土试验结果与原状土相进行比较,结果如下。

表 4 自渗注浆加固半径

Tab.4 Reinforced radius of self-permeated grouting

	ω/%	e	平均加固半径/cm
原状土	13.7	1.1	17.0
重塑土 1	12.0	1.1	9.3
重塑土 2	15.0	1.1	8.5

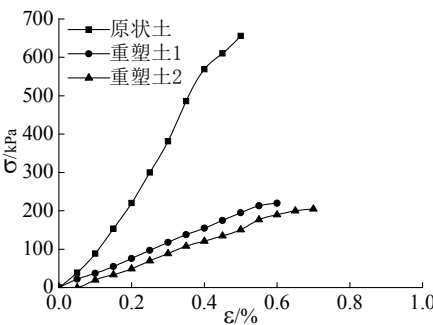


图 12 加固后的原状土与重塑土无侧限抗压强度对比曲线

Fig. 12 Contrast curves of reinforced intact loess's and structureless loess's unconfined compressive strength

表 4 显示出,原状土的加固半径约为重塑土的 2 倍,由图 12 可看出,重塑加固土样的加固强度相比原状加固土样下降 50% 以上。由于原状土具有贯通的大孔隙,利于浆液在土体中流动;原状土体保留了土体原有结构;注浆效果提升显著,加固体强度和抗变形能力均大幅提升。

4 自渗注浆公式推导

现场注浆试验采用花管法注浆,浆液呈现柱形扩散,根据常规柱形扩散公式:

$$R = \sqrt{2kpt / n\beta \ln \frac{R}{r_0}} \quad (1)$$

式中: R 为扩散半径; r_0 为注浆管半径; P 为注浆压力 (cm 水头); k 为黄土渗透系数 (cm/s); t 为注浆时间(s); n 为黄土孔隙率; β 为浆液与水的粘度比。

柱形渗透注浆可视为平面径向渗流问题,注浆管半径相对于周围土体可简化为半径为 r_0 的圆,通过拉普拉斯变换^[16]可得:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) = 0 \quad (2)$$

求解条件为: $p(r=r_0)=p_1; p_g(r=R)=p_2; p_w(r=R)=p_2;$

$V_g(r=R)=V_w(r=R); p(r \rightarrow \infty)=p_3.$

式中: R 为浆液扩散半径; V_g 为浆液的渗流速度 (cm/s); V_w 为水的渗流速度 (cm/s); p_w 为水压力 (cm 水头); p_g 为浆液压力 (cm 水头); p_1 为注浆压力 (cm 水头); p_2 为浆水分界面处压力 (cm 水头); p_3 为与注浆端头同一水平面在地下水影响半径处压力 (cm 水头)。

对 (2) 式积分两次得:

$$p = c_1 \ln r + c_2 \quad (3)$$

式中 c_1, c_2 为待定常数

在 $r_0 \leq r \leq R$ 范围内,根据求解条件确定 c_1, c_2 :

$$P_g = \frac{P_1 - P_2}{\ln r_0 - \ln R} \ln r + \frac{P_2 \ln r_0 - P_1 \ln R}{\ln r_0 - \ln R} \quad (4)$$

在 $R \leq r \leq \infty$ 范围内,根据求解条件确定 c_1, c_2 :

$$P_w = \frac{P_2 - P_3}{\ln R - \ln R'} \ln r + \frac{\ln R (P_3 - P_2)}{\ln R - \ln R'} \quad (5)$$

根据梯度定义, $I = -dp/dr$, 定义浆液压力头梯度 I_g 和水头梯度 I_w , 得出:

$$I_g = -\frac{P_1 - P_2}{\ln r_0 - \ln R} \frac{1}{r} \quad (r_0 \leq r \leq R) \quad (6)$$

$$I_w = -\frac{P_2 - P_3}{\ln R - \ln R'} \frac{1}{r} \quad (R \leq r \leq \infty) \quad (7)$$

当 $r=R$ 时, 由 $V_g(r=R)=V_w(r=R)$, 得:

$$k_g I_g = k_w I_w \quad (8)$$

式中, k_g, k_w 分别为浆液和水在黄土中的渗透系数。

联立 (6)、(7)、(8) 式可得:

$$p_2 = \frac{k_g p_1 \ln(R/R_e) + k_w p_3 \ln(r_0/R)}{k_w \ln(r_0/R) + k_g \ln(R/R_e)} \quad (9)$$

设注浆加固体为半径是 R , 高为 h 的柱体, 土体的孔隙率为 n , 假定土骨架不可压缩, 在注浆时该部分体积被浆液充满, 得:

$$Q = \pi R^2 \cdot h \cdot n \quad (10)$$

式(10)也可写为

$$Q = 2\pi R \cdot h \cdot k_w \cdot (I_w)_{r=R \cdot t} \quad (11)$$

式中, t 为注浆时间 (s)

由 (9)、(10) 可得注浆压力、时间、扩散半径的关系:

$$p_1 = \frac{R^2 n}{2k_w t} \left[\frac{k_w}{k_g} \ln(R/r_0) + \ln \frac{R_e}{R} \right] + p_3 \quad (12)$$

式(9)及式(12)相对于常规柱形扩散公式, 多考虑了 p_2 和 p_3 , 因此更接近于实际情况, 根据所推导公式对水玻璃在黄土中的自渗注浆量和注浆半径进行计算, 结果见表 5。

表 5 自渗注浆试验综合分析

Tab.5 Overall results of self-permeated grouting test

注浆孔编号	注浆半径			注浆量		
	理论值 /cm	实测值 /cm	误差 /%	理论值 /L	实测值 /L	误差 /%
1~4	19.1	14.5	24.1	27.0	15.6	42.3
5~8	17.3	12.7	26.5	36.8	20	45.7
9~12	17.6	13.2	25.3	41.0	24	41.5

由推导的自渗注浆柱形扩散公式, 计算出的注浆半径理论值均大于实测值, 注浆量理论计算值与实测值间约有 40% 的差异。

在注浆试验中, 实测值与理论值产生误差的原因有: 原状黄土不可能满足各向同性性质与理论计算做出的各向同性与均质假设有一定的差异; 水玻璃浆液在自渗过程中, 浆液温度由于环境原因会导致粘滞系数发生变化而理论计算时将其假定为稳定浆液; 水玻璃在黄土中扩散时, 由于其与黄土发生胶凝作用可能会出现堵塞问题等。

试验值与理论计算值二者间的差异在 -50%~100% 范围内都是可接受的误差范围^[17], 并在国内的试验研究中得到广泛应用。在总体上, 本文推导的自渗注浆柱形扩散公式能较好反应水玻璃在黄土中的自渗规律, 可谓实际注浆工程提供理论支撑与指导作用。

5 结 论

(1) 水玻璃自渗注浆加固原状黄土是可行的, 在试验条件下, 单管注浆其影响深度约为 0.70 m, 影响半径约为 0.14 m, 单孔注浆量平均为 15.6 L。自渗注浆竖向加固范围约为水平方向的 5 倍。

(2) 经自渗加固的原状黄土其强度和抗变形能力均大幅提高,并且具有良好的水稳定性。

(3) 通过室内模型试验,自渗注浆半径随着土体含水量增大而减小,随着孔隙比增大而增大。

(4) 原状土体结构保存完整,并且具有贯通的大孔隙,有利于提高注浆加固效果,原状加固土的强度和抗变形能力明显大于重塑加固土。

(5) 推导出的自渗注浆柱形扩散公式,在可接受误差范围内,注浆半径和注浆量其理论计算值与实测值之间的差异分别约为25%和40%。

参考文献 References

- [1] 尹亚雄,王新生,韩文峰,等. 加气硅化黄土的微结构研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6):1629-1633.
YIN Yaxiong, WANG Xinsheng, HAN Wenfeng, et al. Study on Microstructure of CO₂-silicification Grouted Loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1629 - 1633.
- [2] 蔡东艳,韩晓雷. 水玻璃加固土的特性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2004, 36(2):233-235.
CAI Dongyan, HAN Xiaolei. A Research on the properties of loess reinforced with waterglass[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch.e & Tech.(Natural Science Edition), 2004, 36(2):233-235.
- [3] Larionova N A, Samarin E N, Voronkevich S D, et al. Chemica grouting of subsidence loess by sodium silicate solutions with low weight ratio[J]. Grouting and Deep Mixing, 2012:1968-1971.
- [4] 葛家良. 化学灌浆技术的发展与展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(z2):3384-3392.
GE Jialing. Development and prospect of chemical grouting techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(z2):3384-3392.
- [5] B. N. Isaev, Yu. Zelenskii, L. P. Shuvalova, Yu. I. Semenov. Stabilization of Saturated Loess Soils by Gas Silication[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1979, 16(2):65-69.
- [6] 肖尊群,刘宝琛,乔世范,等. 新型酸性水玻璃-碳酸钙注浆材料试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 32(8):1640-1646.
XIAO Zunqun, LIU Baochen, QIAO Shifan, et al. Experimental Research on New Grouting Materials of Acidic Water Glass-Calcium Carbonate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 32(8):1640-1646.
- [7] 王银梅,高立成. 黄土化学改良试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6):1071-1077.
WANG Yinmei, GAO Licheng. Experimental research on chemical improvement of loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6):1071-1077.
- [8] 贾厚华. 化学改良土无侧限抗压强度研究[J]. 土工基础, 2010, 24(3):84-87.
JIA Houhua. Experimental research on unconfined compressive strength for chemical-improved soil[J]. Soil Engineering and Foundation, 2010, 24(3):84-87.
- [9] 李喜安,黄润秋,彭建兵. 黄土崩解性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1):3207-3213.
LI Xi'an, HUANG Runqiu, PENG Jianbing. Experimental Research on Disintegration of Loess[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1):3207-3213.
- [10] 王娟娟,张秀丽,王铁行. 考虑含水量和密度影响的压实黄土抗剪强度特性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2014, 46(5):687-691.
WANG Juanjuan, ZHANG Xiuli, WANG Tiehang. The shear strength research of compacted loess considering the impact of moisture content and dry density[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch.e & Tech.(Natural Science Edition), 2014, 46(5):687-691.
- [11] 黄春香,简文彬. 软土特性与水泥-水玻璃加固土效应的试验[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2001, 29(3):91-95.
HUANG Chunxiang, JIAN Wenbin. Effects of soft soil properties on soil stabilized with cement-sodium silicate[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2001, 29(3):91-95.
- [12] 吕擎峰,吴朱敏,王新生,等. 温度改性水玻璃固化黄土机制研究[J]. 岩土力学, 2003, (5):1293-1298.
LV Qingfeng, WU Zhumin, WANG Xinsheng, et al. Mechanism of temperature-modification silicification grouted loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, (5): 1293-1298.
- [13] 吕擎峰,吴朱敏,王新生,等. 复合改性水玻璃固化黄土机理研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2):324-329.
LV Qingfeng, WU Zhumin, WANG Xinsheng, et al. Mechanism of loess solidified with compound modification sodium silicate[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(2):324-329.
- [14] 李中军,贾汉东,申小清,等. 水玻璃-乙酸乙酯体系的成胶特性及SiO₂凝胶粉末的制备[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(3):77-79.
LI Zhongjun, JIA Handong, SHEN Xiaoqing, et al. The gelling characteristic of water glass-ethyl acetate system and the preparation of silica powder[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2000, 28(3):77-79.
- [15] 吕擎峰,刘鹏飞,申贝,等. 温度改性水玻璃固化黄土冻融特性研究[J]. 工程地质学报, 2015(1):59-64.
LV Qingfeng, LIU Pengfei, SHEN Bei, et al. Laboratory study on peculiarity of loess solidified with temperature-modified sodium silicate under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2015 (1): 59-64.
- [16] 阙云,刘强华,李丹,等. 渗透注浆扩散理论探讨[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(5):105-108.
QUE Yun, LIU Qinghua, LI Dan, et al. Research on diffusion theory of permeation grouting[J]. Journal of Chongqing Jiao Tong University, 2006, 25(5):105-108.
- [17] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15):2709-2714.
RUAN Wenjun. 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.

(编辑 沈波)