

水泥水玻璃注浆加固黄土隧道富水软弱段试验研究

吴昊, 杨晓华

(长安大学公路学院, 陕西西安710064)

摘要: 针对黄土隧道富水软弱段围岩强度低、自稳能力差, 极易发生地质灾害的现状, 在室内测定了水泥-水玻璃浆液不同配比下的凝结时间以及注浆加固时影响土体无侧限抗压强度因素的基础上, 通过现场模拟试验, 对水泥-水玻璃浆液配比、注浆压力、浆液扩散半径等技术参数和注浆加固后复合土体的强度进行了研究。结果表明: 水灰比取1:1、水玻璃浓度取30~35°Be'及水泥水玻璃体积比取1:1制备的浆液凝胶时间较为合理; 当土体含水率为20%、密度1.8 g/cm³、水玻璃浓度35°Be'及浆液掺入比为15%时, 其无侧限抗压强度最大; 现场模拟试验表明: 注浆压力在0.4~1.0 MPa时, 浆液的扩散半径为0.4~0.9 m, 加固后土体的力学性能有了较大的改善, 其极限荷载为300 kPa, 变形模量为21.48 MPa。

关键词: 黄土隧道; 富水软弱段; 水泥水玻璃注浆; 注浆加固试验

中图分类号: U455

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0196-05

Experimental study on strengthening water-rich soft section of loess tunnel by cement-water glass grouting

WU Hao, YANG Xiaohua

(College of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710064, China)

Abstract: In view of water-rich section of the loess tunnel, which has the low strength surrounding rock, poor self-stability and frequent geological disasters, on the basis of measuring the gelation time of cement-water glass grout at different mixture ratio and influencing factors of unconfined compressive strength of soil during grouting reinforcement in the laboratory, authors research the technical parameters by the field grouting test, such as mixture ratio, grouting pressure, diffusion radius of grout and grouting technology. The results showed that the reasonable amount of water to cement ratio is 1:1, concentration of water glass is 30~35°Be' and volume ratio of cement-water-glass is 1:1. When the soil moisture content is 20% and density is 1.8 g/cm³, with water glass concentration 35°Be' and slurry ratio 15%, the maximum unconfined compressive strength is the largest. The simulation shows that when grouting pressure is 0.4~1.0 MPa, the diffusion radius of the slurry is 0.4~0.9 m, the mechanical properties of the soil have been greatly improved after reinforcement. Its ultimate load of the soil is 300 kPa and the deformation modulus is 21.48 MPa.

Key words: loess tunnel; water-rich soft section; cement-water-glass grouting; consolidation test

1 研究背景

黄土隧道富水地段围岩强度低、自稳能力差, 极易发生塌方、突水涌泥等施工地质灾害。采用水泥水玻璃注浆加固黄土隧道是预防其灾害的常用方法。国内许多学者对水泥水玻璃注浆加固效果进行

了研究^[1-5]。水泥水玻璃不同配合比浆液的凝胶时间的不同对隧道土体加固的效果影响明显。大多数工程仅凭以往的经验来选择浆液的配制及注浆参数^[6-15], 往往造成方案设计不合理以及实际注浆量浪费。因此, 对不同配比下浆液的凝胶时间规律及其加固黄土后复合土体的强度增长特性进行深入

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-10-17

作者简介: 吴昊(1984-), 男, 广东大埔人, 博士研究生, 主要从事隧道围岩加固与结构支护、隧道通风运营管理等方面的研究。

通讯作者: 杨晓华(1961-), 男, 河北唐山人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事路基边坡支挡防护、特殊地基处理、隧道围岩加固与结构支护等方面的研究。

研究是很有必要的,可以为黄土隧道水泥水玻璃加固法提供合理的浆液配合比及重要的参数依据。

本文结合室内试验及现场模拟试验,研究了浆液在不同配比下的凝结时间以及注浆加固时影响土体无侧限抗压强度的因素;基于现场模拟试验,对注浆压力、浆液扩散半径及注浆加固后复合土体的强度进行了深入研究,旨在为黄土隧道施工灾害的处治方案提供参考。

2 水泥-水玻璃凝胶时间试验研究

2.1 试验方案

通过测定不同的水玻璃浓度、水灰比及水泥水玻璃体积比情况下浆液的凝胶时间,分析水玻璃浓度、水灰比及水泥水玻璃体积比对凝胶时间的影响,从而为黄土隧道注浆加固提供合理的浆液配合比,试验制定配比方案如表 1。

2.2 试验方法

试验具体步骤如下:将水泥浆液和水玻璃溶液分别置于两个烧杯内,首先将其中一个烧杯的液体

倒入另一烧杯内,紧接着将混合液体倒入之前的烧杯中,不停重复这一步骤,直至烧杯内的液体凝胶,不再流动为止。从第一次合成混合液体开始计时到混合液体不再流动的时间即为凝胶时间。

2.3 试验结果及分析

试验测得的不同水泥水玻璃体积比及水灰比下浆液的凝结时间如表 1 所示。

表 1 不同水泥水玻璃体积比及水灰比下浆液的凝结时间

水泥:水玻璃 <i>C/S</i>	水灰比 <i>W/C</i>	水玻璃浓度/ $^{\circ}\text{Be}'$			
		30	35	40	45
1:1	0.6:1	52	59	73	87
	0.8:1	57	79	97	119
	1.0:1	73	86	115	134
1:0.5	0.6:1	29	32	38	46
	0.8:1	34	39	45	55
	1.0:1	41	49	56	65

分别绘制不同水灰比和不同水玻璃浓度下浆液的凝胶时间曲线图,如图 1、2。

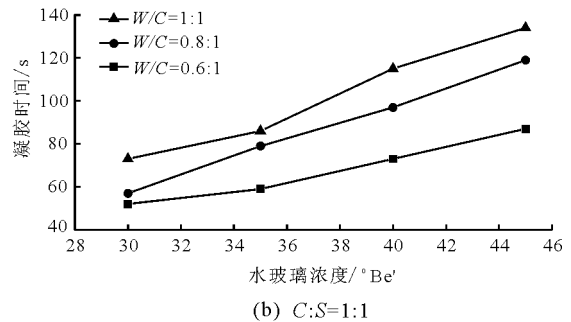
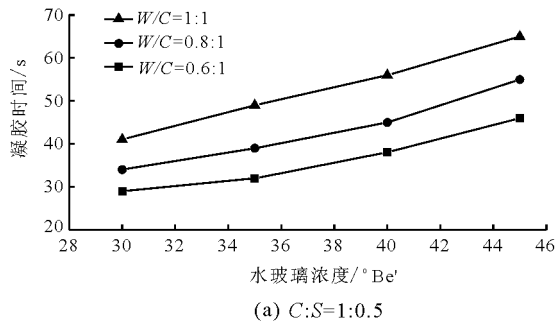


图 1 不同水灰比下浆液凝胶时间曲线

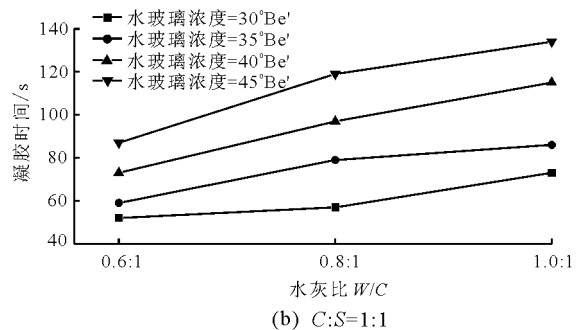
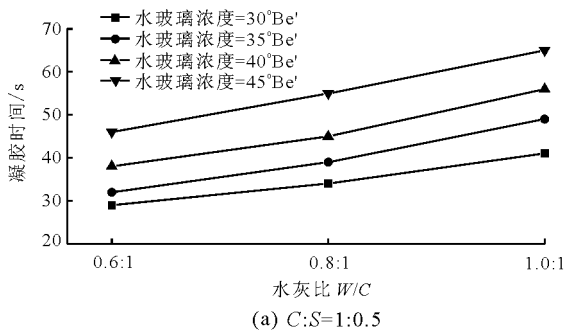


图 2 不同水玻璃浓度下浆液凝胶时间曲线

由图 1、2 可以看出,水玻璃浓度、水灰比 (W/C) 和水泥与水玻璃体积比 ($C:S$) 均对浆液凝胶时间有影响,同等 W/C 和 $C:S$ 情况下,随着水玻璃浓度的增加,双液浆的凝胶时间显著增加;当水玻璃浓度及 $C:S$ 相同时,凝胶时间随着 W/C 的增加而增加;当水玻璃

浓度及 W/C 一定时,凝结时间随着 $C:S$ 增大而减少。当 $C:S$ 为 1:0.5、水玻璃浓度为 $30^{\circ}\text{Be}'$ 、 W/C 为 0.6:1 时,浆液凝结时间最短,为 29 s;当 $C:S$ 为 1:1、水玻璃浓度为 $45^{\circ}\text{Be}'$ 、 W/C 为 1:1 时,浆液凝结时间最长,为 134 s。在实际工程注浆加固中,需考虑这些因

素对凝胶时间的影响,才能制定合理的配合比。本文针对黄土隧道富水软弱段土体加固处理推荐的合理配合比为:水泥比应选取 1:1,水玻璃浓度取 30~35° Be',水泥水玻璃体积比取 1:1。

3 水泥-水玻璃浆液加固黄土试验研究

提高围岩强度是黄土隧道富水软弱段进行水泥水玻璃注浆的主要目的。但现有研究中有关浆液加固土体后复合土的强度参数多凭借经验判断。本文以浆液掺入率作为模拟注入率的指标,将重塑土与水泥及水玻璃进行拌合制样,养护后进行无侧限抗压强度试验,分析浆液的掺入率、土样的含水率、水玻璃浓度对其强度的影响。

试验所用黄土呈褐黄色、略湿、均匀性和孔隙发育良好、含少量植物根系和蜗牛壳碎片,其基本物理性质如表 2 所示。

表 2 试验黄土的基本物理性质

相对密度 G_s	液限/ %	塑限/ %	天然含 水率/%	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
2.70	19.1	27.8	16.8	1.36

试验中主要考虑黄土含水率、黄土密度、浆液掺入率及水玻璃浓度的影响因素。具体试验参数如表 3 所示。对 4 种参数进行正交组合,共制备 24 个不同组合的试块,养护完成后,采用万能压力机开展无侧限抗压强度试验。

表 3 试验工况参数设计

工况	水泥水 灰比	浆液 玻璃体 积比	浆液 掺入 率/%	黄土 含水 率/%	黄土 密度/ ($g \cdot m^{-3}$)	水玻璃 浓度/ ° Be'
1	1:1	1:1	5	20	1.6	30
2			10	25	1.8	35
3			15			

试验的步骤与过程按照图 3 进行。

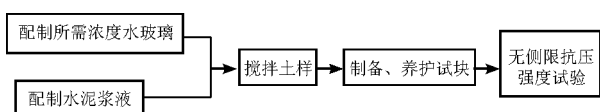


图 3 试验步骤示意图

试验结果如表 4 所示。

通过分析表 4 的试验结果得出,水泥-水玻璃加固黄土时,土体的含水率、密度、水玻璃浓度及浆

液掺入率对其强度有显著影响。

(1)浆液掺入比的影响。从表 4 中可以看出,在土体含水率、密度及水玻璃浓度相同的情况下,试块的无侧限抗压强度随着浆液掺入比的升高而增大。当土体含水率为 20%、密度 $1.6 g/cm^3$ 及水玻璃浓度为 30° Be'时,浆液掺入比对土体无侧限抗压强度的影响最大,浆液掺入比由 5% 变为 10%、15% 后土体的无侧限抗压强度分别提高了 48.79%、120.56%。这主要是因为水泥含量是决定试件抗压强度的主要因素,试件内的水泥含量随着浆液掺入比的增大而增大,试件的抗压强度也会随之变大。

表 4 不同参数浆液加固黄土无侧限抗压强度 kPa

浆液与土样参数			水玻璃浓度/° Be'	
浆液掺 入比/%	含水率/ %	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	30	35
5	20	1.6	67.5	87.2
		1.8	139.4	180.9
	25	1.6	49.6	78.3
		1.8	122.9	163.3
		1.6	80.5	125.1
		1.8	187.8	220.8
10	20	1.6	73.8	111.6
		1.8	187.3	201.3
	25	1.6	109.4	164.0
		1.8	248.7	297.5
		1.6	109.4	145.9
		1.8	217.1	260.5

注:(1)水泥为 425#普通硅酸盐水泥;(2)试块在室温内养护 28 d。

(2)含水率的影响。当其他条件一定时,含水率 20% 土体的无侧限抗压强度高于含水率 25% 土体,这是因为当浆液加入土壤中,浆液中的水泥会产生水化作用,消耗土壤中的水分。当土体含水率过低时,浆液内的水泥不能完全水解,使得水泥水化产物变少,导致加固土体无法达到预期的加固效果。反之,当土体的含水率过大时,会导致单位体积内水泥水化产物过少,不能形成有效的整体强度,从而降低加固土体的强度。故理论上存在一个含水率阈值,当土体含水率小于该阈值时,无侧限抗压强度随着含水率呈正相关关系;当含水率超过该阈值时,无侧限抗压强度含水率呈负相关关系。由本次试验可以看出,土体的含水率的理论阈值应在 25% 以内。

(3)密度的影响。其他条件相同时,土体无侧限抗压强度随着密度的增加而增大。当土体含水率为 20%、水玻璃浓度为 35° Be' 及浆液掺入比为

10%时,密度从 1.6 g/cm^3 变为 1.8 g/cm^3 其抗压强度增长率最小,为76.5%;当土体含水率为25%、水玻璃浓度为 $30^\circ\text{ Be}'$ 及浆液掺入比为10%时,密度从 1.6 g/cm^3 变为 1.8 g/cm^3 其抗压强度增长率最大,达到153.79%,可见密度对土体无侧限抗压强度影响较为显著。

(4)水玻璃浓度的影响。土体抗压强度之所以能够得以加强主要因为溶液中与 Ca^{2+} 产生硅酸盐水化物增多而引起的。当土体含水率为20%、密度 1.8 g/cm^3 及浆液掺入比为10%时,水玻璃浓度对土体无侧限抗压强度的影响最小,浓度由 $30^\circ\text{ Be}'$ 变为 $35^\circ\text{ Be}'$ 后土体的无侧限抗压强度提高7.47%;当土体含水率为25%、密度 1.6 g/cm^3 及浆液掺入比为5%时,水玻璃浓度对土体无侧限抗压强度的影响最小,浓度由 $30^\circ\text{ Be}'$ 变为 $35^\circ\text{ Be}'$ 后土体的无侧限抗压强度提高了57.86%。

试验结果表明,土体含水率为25%、密度 1.6 g/cm^3 、水玻璃浓度 $30^\circ\text{ Be}'$ 及浆液掺入比为5%时,土体无侧限抗压强度最小,为49.6 kPa;土体含水率为20%、密度 1.8 g/cm^3 、水玻璃浓度 $35^\circ\text{ Be}'$ 及浆液掺入比为15%时,土体无侧限抗压强度最大,达到297.5 kPa。

4 水泥-水玻璃浆液加固黄土室外模拟试验

浆液扩散方式、扩散半径及注浆后加固效果在实际工程中都并无固定得标准。通过设计室外模拟试验,能够更好地观测双液注浆时浆液在隧道软弱段中的扩散情况及探究注浆加固效果。该试验中主要考虑注浆量、注浆压力、浆液扩散半径等参数,以便更深入地了解注浆技术,为注浆设计和施工提供参考。

4.1 试验模型及材料

(1)在试验场地上开挖一个满足试验要求的试坑,尺寸为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 。

(2)本次试验用采用 $\Phi 30\text{ mm}$ 、厚度2.5 mm、L(长度)30 mm的无缝钢管作为注浆用花管。注浆眼在管壁呈螺旋式分布,每个截面取一个孔眼,孔眼轴线间距为20 cm。

(3)注浆设备主要包括注浆泵、搅拌机、胶管、贮浆桶、混合器、止浆塞等。采取双液系统注浆。

(4)试验材料使用的注浆材料为425#普通硅酸盐水泥和水玻璃,试验样土取自西安渭河北岸泾渭新区。

4.2 试验方法及步骤

本次注浆模拟试验采用水灰比为1:1,水泥水玻璃体积比为1:1,水玻璃浓度为 $35^\circ\text{ Be}'$ 的水泥水玻璃注浆;填土密度为 1.78 g/cm^3 ,含水率为22.5%。注浆时间为30 min,注浆量413 L,注浆压力控制在0.2~1.5 MPa之间,根据试验进行调整。

注浆注浆前对土体进行平面载荷试验,分8级加载(每级荷载加载15 min,持续2 h)选用直径为56.4 cm(面积为 $2\ 500\text{ cm}^2$)的承压板;注浆28 d后在试验面对称选取3个试样点分别进行平板载荷试验,主要步骤如图4所示,平板载荷试验试点选取如图5所示。

4.3 试验结果分析

浆液扩散示意图如图6所示,开挖效果图如图7所示。浆液扩散大部分在700 mm以内,其中试坑上部分局部可到达900 mm。由平板载荷试验绘出其P-S曲线,如图8所示。

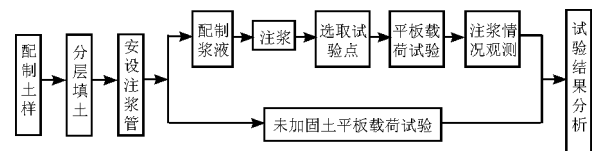


图4 试验步骤示意图

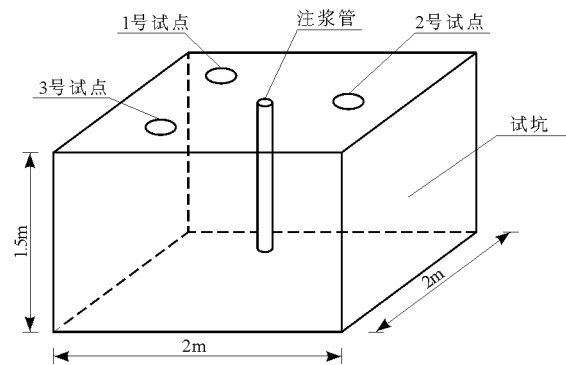


图5 平板载荷试验试点位置示意图

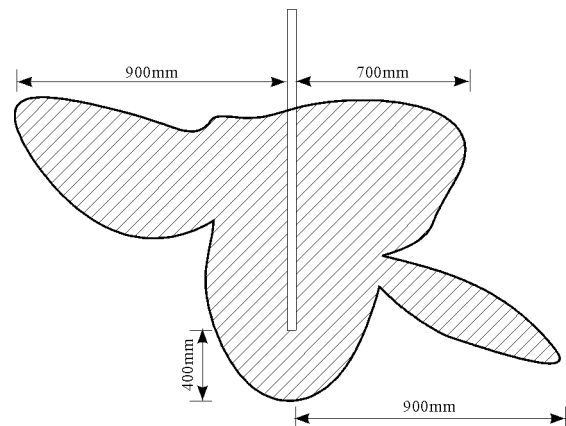


图6 土体中浆液扩散示意图



图7 浆脉示意图

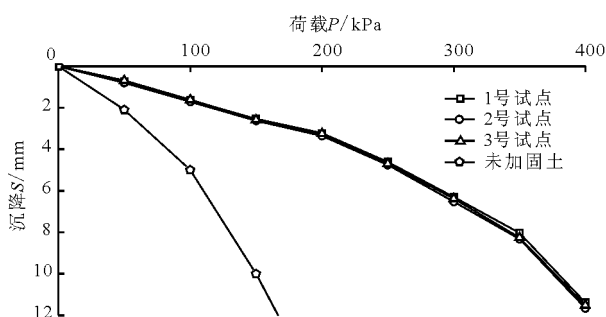


图8 平板载荷试验 P - S 曲线图

根据 P - S 曲线,未加固土的极限荷载为 100 kPa,由直线段斜率计算得到其变形模量为 8.87 MPa;注浆后土体的极限荷载为 300 kPa,其变形模量为 21.48 MPa。

5 结论

(1)水泥 - 水玻璃浆液可以通过调整配比的方法获得不同的凝胶时间,较单液注浆加固,其具有时间短且可准确控制的优点。在加固黄土隧道富水软弱段时,水泥 - 水玻璃浆液的配比应为:水灰比为 1:1,水玻璃浓度为 30 ~ 35°Be',水泥水 - 玻璃体积比为 1:1。

(2)水泥 - 水玻璃注浆加固效果受到了浆液掺入比、土样含水率、土样密度、水玻璃浓度以及水泥浆与水玻璃体积比的影响。其中浆液掺入比对土体的无侧限抗压强度的影响最大,水玻璃浓度对土体无侧限抗压强度的影响最小。当土体含水率为 20%、密度 1.8 g/cm³、水玻璃浓度 35°Be'和浆液掺入比为 15%时,土体的无侧限抗压强度最大,达到 297.5 kPa。

(3)结合之前室内试验的结果,通过现场模拟

试验,得到了水泥 - 水玻璃混合双液注浆的技术参数,可为水泥水玻璃加固黄土隧道富水软弱段提供参数依据。

(4)在现场试验中并未考虑实际土体中的颗粒粒径和渗透系数,对土体的密度以及孔隙率也只是大体估计,以后可以做进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨晓华,俞勇华. 水泥 - 水玻璃双液注浆在黄土隧道施工中的应用[J]. 中国公路学报,2004,17(2):68 - 72.
- [2] 赵允. 富水破碎围岩隧道水泥 - 水玻璃注浆与检测研究[D]. 北京:中国地质大学,2018.
- [3] 陈光新,孙文成,陈学武. 水泥 - 水玻璃双液浆凝胶时间试验分析[J]. 广东公路交通,2014(4):64 - 66.
- [4] 程福周,雷学文,孟庆山,等. 水泥 - 水玻璃固化东湖淤泥的室内试验研究[J]. 人民长江,2013,44(24):45 - 48.
- [5] 陶云平. 双液注浆技术在富水黄土隧道加固中的应用[J]. 山西建筑,2018,44(16):153 - 154.
- [6] 渠巨华. 黄土隧道渗漏水病害分析及治理[J]. 西部探矿工程,2006(8):158 - 159.
- [7] 杨晓华,谢永利. 公路隧道塌方综合处治技术[J]. 长安大学学报(自然科学版),2004,24(1):61 - 64.
- [8] 孙斌科. 燕家岭黄土隧道的塌方处理[J]. 西部探矿工程,2002(6):79.
- [9] 钱忠运. 黄土公路隧道地质灾害预防技术研究[D]. 西安:长安大学,2009.
- [10] 薛晓辉,张军,宿钟鸣,等. 山岭公路隧道富水黄土地层注浆加固技术[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(3):278 - 282.
- [11] 周茗如,陈志超,罗小博,等. 湿陷性黄土中水泥浆液注浆加固机理[J]. 建筑科学与工程学报,2017,34(6):65 - 70.
- [12] 安妮,赵宇,石文广,等. 水泥 - 水玻璃双液浆的特性试验研究及应用[J]. 铁道建筑,2011(12):128 - 130.
- [13] 金鑫,王铁行,于康康,等. 水玻璃自渗注浆加固原状黄土效果及评价[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(4):516 - 521.
- [14] 王小林,高海通,孟敏强. 隧道穿越饱和软黄土合理注浆半径范围研究[J]. 城市轨道交通研究,2017,20(1):65 - 68.
- [15] 张伟杰. 隧道工程富水断层破碎带注浆加固机理及应用研究[D]. 济南:山东大学,2014.