

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.01.027

强风化层超浅埋隧道高压旋喷桩荷载试验研究

鲁立洋¹,刘欢²,李聘聘^{3*}

(1.广东云茂高速公路有限公司,广东广州 510623;2.安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司,安徽合肥 603357;
3.西南交通大学土木工程学院交通隧道工程教育部重点实验室,四川成都 610031)

摘要:以广东云茂高速公路新屋隧道的超浅埋施工为工程背景,对高压旋喷桩在全风化地层超浅埋隧道围岩加固处理的施工关键参数、地层加固效果进行对比研究。结果表明:①浆液压力、旋喷转速和提升速度对单桩静荷载承载力有明显的影响。相同静荷载条件下,浆液压力越大,单桩累计沉降值越低,累计沉降值增加较小,回弹量变化率基本相同;随着旋喷转速的增加,单桩累计沉降值越低,单桩累计沉降值变化率减小,回弹量变化率也减小;随着提升速度的提高,单桩累计沉降值提高,累计沉降值变化率减小,回弹量变化率基本保持不变;②桩体水泥土较均匀,强度较高且脆,冒浆部位所处地层主要为松散的粉质黏土层和含砂层;③经过高压旋喷桩底层加固之后,超浅埋隧道开挖后顶部围岩较稳定,围岩间裂隙被水泥浆液填充固结、完整性提高;桩体有效限制边墙外侧土体向隧道内侧变形,桩体也起到了一定的止水作用;高压旋喷桩加固提高围岩整体性,起到了固结隧道拱顶以上软弱土层的作用,为隧道浅埋段安全开挖创造了条件。

关键词:高压旋喷桩;超浅埋隧道;全风化地层;围岩加固;试验研究

中图分类号:U451

文献标志码:A

0 引言

随着中国高速公路网建设的快速发展,高速公路隧道经常遇到在强风化地层中的超浅埋开挖难题^[1]。由于隧道埋深非常浅,隧道所处地层严重风化,岩体裂隙发育,隧道开挖后围岩自稳能力差且易发生地表开裂、塌陷甚至塌方等问题^[2]。强风化地层超浅埋隧道开挖由于地质条件复杂,施工缺乏成熟的经验和对应标准规范,有效加固地层、防止围岩坍塌发生、保证施工安全是强风化地层中超浅埋暗挖隧道施工成败的关键因素^[3]。

为了提高围岩强度,减小围岩变形,在超浅埋隧道开挖前往往需要对隧道围岩进行预加固。高压旋喷桩是在地表钻孔后采用高压旋喷水泥砂浆,利用高压浆液快速切削搅拌土体,使水泥和土体混合,以提高地层强度。现在公路、铁路的浅埋隧道逐渐采用高压旋喷桩施工技术进行地表软弱围岩加固,并

取得良好效果^[5-9]。王延宁等^[7]在港珠澳大桥桥隧结合段采用高压旋喷桩进行软土地基加固处理,加固区域置换率为31.4%~40.3%,水灰比为0.8,通过现场原位试验证明高压旋喷桩复合地基可以有效提高地层弹性模量、减小地层透水性;任伟新^[8]将高压旋喷桩运用到饱和含水层浅埋隧道施工中,采用的喷浆压力为20~23 MPa、旋转速度为10~15 r/min、提升速度为10~15 cm/min、水灰比为1,研究发现高压旋喷桩成桩质量受饱和动水砂层等不良地质影响很大,在大面积旋喷前应进行现场旋喷试验,以便取得较好的加固效果;阙寿洪等^[9]研究了砂状土浅埋隧道应用高压旋喷桩进行地层加固,采用水泥用量为400 kg/m、水灰比为0.8、成桩无侧限抗压强度大于1.5 MPa,实践表明高压旋喷桩具有改善隧道受力形式、提高地层止水效果和加快隧道施工的作用;欧阳林等^[10]通过数值分析对比4种盾构隧道地层加固方案,研究表明高压旋喷桩可以有效起到隔水作用,减小地层损失,降低地表沉降。

收稿日期:2022-02-10(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2017YFC0806000);国家自然科学基金资助项目(编号:51678497)

作者简介:鲁立洋,男,大学本科,工程师.E-mail:275564790@qq.com

*通信作者:李聘聘,男,博士研究生.E-mail:swjtu_lpp@163.com

已有文献对强风化地层的超浅埋隧道中高压旋喷桩加固地层现场试验及应用研究极少。本文以广东省云(浮)茂(名)高速公路新屋隧道的超浅埋隧道施工为工程背景,通过现场试验及理论分析,研究高压旋喷桩地层加固技术在强风化地层超浅埋隧道开挖中的应用创新及加固效果评价,期望研究成果可为高压旋喷桩在强风化地层超浅埋隧道地层加固方面提供一定参考。

1 工程概况

1.1 工程背景

云茂高速公路新屋隧道为分离式隧道,隧道全长

2 501 m,全隧坡度为-2.3%,隧道最大埋深为 218.4 m。隧道洞身穿越两处超浅埋段,超浅埋隧道左线纵断面图见图 1。第一段主要影响范围为左线隧道 ZK84+450~ZK84+476(长约 26 m),右线隧道 K84+453~ZK84+475(长约 22 m)。左线露顶约 1 m,右线最小覆盖层厚约 2 m,地表水发育、沟渠发育;第二段主要影响范围为左线隧道 ZK84+628~ZK84+829(长约 201 m),右线隧道 K84+644~ZK84+795(长约 151 m)。四周地势起伏大,中部稍平缓、大多为水田、汇水面积大,受地势影响浅埋段内为泄洪通道,部分段落已为冲沟;浅埋段线路上游及正上方分布几处水塘,地表还存在水井、电力通信电杆零星分布,民房 10 余栋,该段最小覆土层厚度约为 7 m。

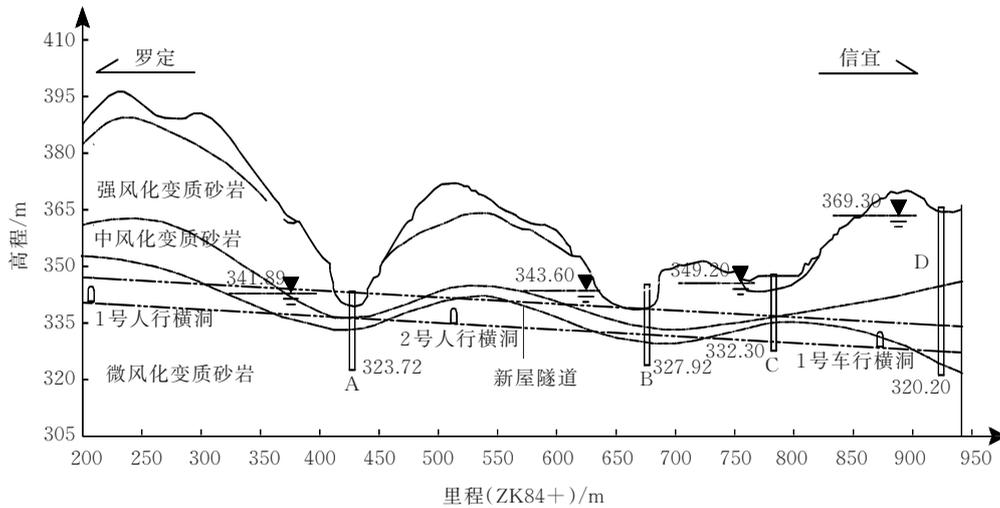


图 1 超浅埋段左线纵断面图

1.2 工程地质概况

隧址区地层岩性为第四系坡残积粉质黏土、元古代云开岩群变质砂岩、加里东期花岗岩及其风化层。隧道围岩情况由地表至隧底由上至下依次为耕植土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、细砂、粉质黏土、强微风化变质砂,之下为中风化变质砂岩(隧底以下)。土层分布情况如表 1 所示。段内地下水位基本位于原地面,常年有地表水流淌。隧道所在地层的地质纵向分布情况见表 1。

1.3 超浅埋试验段施工设计

(1) ZK84+450~ZK84+476 及 K84+453~K84+475 段洞内采用单侧壁开挖, XS-Va 型复合式衬砌,超前支护采用双层小导管,小导管间距 0.4 m,单根长度 4 m,每环 37 根,纵向 2.4 m/环,初支采用 $\phi 25$ mm 中空注浆锚杆,单根长度 3.5 m,间距为

表 1 隧道地层地质分布表

层厚/ m	层高程/ m	地层描述
1.1	342.92	粉质黏土:褐黄色,潮湿,可塑性好,黏性一般
3.1	339.82	淤泥质粉质黏土:灰褐色,饱和状态,软塑,具腥臭味
3.2	336.62	粉质黏土:褐黄色,潮湿,软塑性,含较多粉粒
2.4	334.22	细砂:褐黄色,饱和状态,颗粒稍密
2.7	331.52	强风化变质砂岩:黄褐色、灰褐色,风化裂隙发育,岩芯呈碎块及块状,岩质较软
3.7	327.82	中风化变质砂岩:黄褐色、青灰色,细粒变晶结构,块状构造,裂隙发育,岩芯多呈碎块及块状,少量短柱状,裂面多有变色,岩质较硬
4.1	323.72	微风化变质砂岩:灰青色,细粒变晶结构,块状构造,裂隙较发育,岩芯多呈柱状,局部块状,节长 10~33 cm,岩芯约占 60%,岩质新鲜较硬

100 cm×60 cm(环向×纵向), I20a 工字钢间距 0.6 m/榀, 锁脚锚杆为 $\phi 22$ mm 药卷锚杆, 单根长度 3 m, 每环 8 根。二衬采用 C30 防水钢筋混凝土, 厚度 50 cm。

(2) ZK84+579~ZK84+859 及 K84+644~ZK84+795 段洞内采用 CD 法开挖, XS-Va 型复合式衬砌, 超前支护采用双层小导管, 间距 0.4 m, 单根长度 4 m, 每环 37 根, 纵向 2.4 m/环, 初支采用 $\phi 25$ mm 中空注浆锚杆, 单根长度 3.5 m, 间距为 100 cm×60 cm(环向×纵向), I20a 工字钢间距 0.6 m/榀, 锁脚锚杆为 $\phi 22$ mm 药卷锚杆, 单根长度 3 m, 每环 8

根。二衬采用 C30 防水钢筋混凝土, 厚度 50 cm。

2 高压旋喷桩现场试验

高压旋喷桩施工工艺较为复杂, 加固隧道浅埋段地质条件及水文情况复杂, 须开展现场试喷试验, 确定各项关键技术指标, 以确保加固和防渗效果, 保障隧道洞内顺利开挖和良好的后期运营^[10]。图 2 为超浅埋隧道高压旋喷桩平面布置设计图。为了测试高压旋喷桩的成桩效果和洞内加固情况, 分别开展了地面成桩试验和隧道地层加固试验。

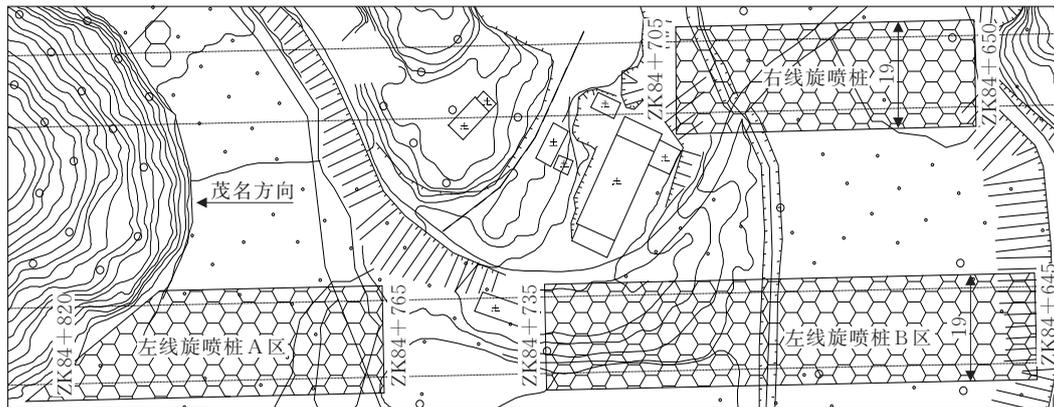


图 2 隧道浅埋段高压旋喷桩平面布置图(单位:m)

2.1 旋喷桩地表试验方案设计

旋喷压力需要综合考虑土体的密实性、抗压强度、耐冲刷性等^[11]。提升速度对旋喷桩的成桩固结体质量和直径都有很大的影响^[12]。旋喷转速和提升速度是两个相关性的参数, 根据施工经验, 单管旋喷桩提升高度范围为 0.5~1.25 mm/r。为了满足在距离喷嘴 0.25 m(成桩直径为 0.5 m)的土体可以受到 5 次以上的射流冲击, 选定 20 r/min、22 r/min 和 25 r/min 作为试喷参数。

在成桩试验区布置了 76 根高压旋喷桩测试桩, 选择 27 根桩组成 9 组试桩(每组布置 3 根桩), 分别进行单桩静载试验、单桩复合地基静载试验和钻芯取样试验, 具体工况设计见表 2。高压旋喷桩按照正三角形布置, 标准工况的桩体直径为 0.5 m, 间距为 1.5 m, 喷嘴孔径为 3 cm, 喷嘴个数为 2 个, 旋喷转速为 20 r/min, 喷浆压力为 20 MPa, 机械提升速度固定为 25 cm/min, 桩体总长度为 10 m, 桩体平面布置如图 3 所示。

表 2 旋喷桩地表试验工况设计

工况编号	浆液压力/MPa	旋喷速度/ ($r \cdot \min^{-1}$)	提升速度/ ($\text{cm} \cdot \min^{-1}$)	孔径/cm	喷嘴孔径/cm	桩体长度/m
S-D1	20	20	25	50	3	10
S-D2	22	20	25	50	3	10
S-D3	25	20	25	50	3	10
S-R1	20	18	25	50	3	10
S-R2	20	20	25	50	3	10
S-R3	20	22	25	50	3	10
S-T1	20	20	20	50	3	10
S-T2	20	20	25	50	3	10
S-T3	20	20	30	50	3	10

注: S-D 为浆液压力工况; S-R 为旋喷速度工况; S-T 为提升速度工况。每组工况有 3 个试件组分别进行单桩静载试验、复合地基静载试验和钻孔取芯试验。

单桩静载试验采用分级维持荷载沉降相对稳定法, 试验设计要求最大试验荷载为 300 kN, 分 10 级逐步加载维持, 每级加载值(取设计极限荷载的 1/10)

为 30 kN。试验加载到预期最大荷载后,终止加载。单桩荷载试验采用 $\phi 500$ mm 的圆形承压板。试验桩长为 10.0 m。

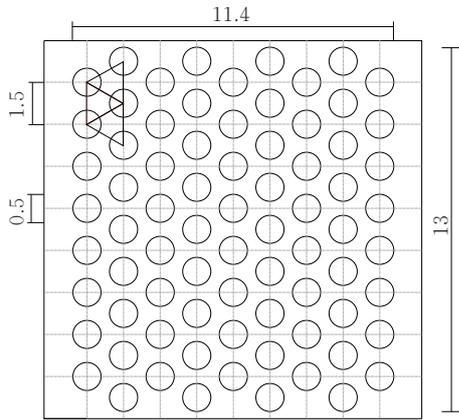


图 3 试验桩平面布置图(单位:m)

单桩复合地基静载试验设计要求最大试验荷载为 200 kN,每级加载量(取预估极限荷载的 1/10)为 20 kN。试验确定承压板尺寸为 1.2 m \times 1.2 m,承压板下方铺设 15 cm 后的砂石褥垫层,试验桩长为 10.0 m。

试验结束后,开挖试验范围内的桩体,检验成桩的完整性和冒浆情况以及承载力,取芯试验则根据施工规范要求采用常规取芯法。

静载试验设备包括 RSM-JC III 静载测试系统 1 套,300 t 千斤顶 1 台,压力传感器 1 台,位移传感器 4 台。荷载值通过压力传感器实际测量得到,桩体沉降值通过荷载板对称分布的 4 个位移计记录。位移计通过磁力底座固定于基准梁,基准梁与荷载板中心点距离为 2.5 m。桩体静载加载示意图图 4。

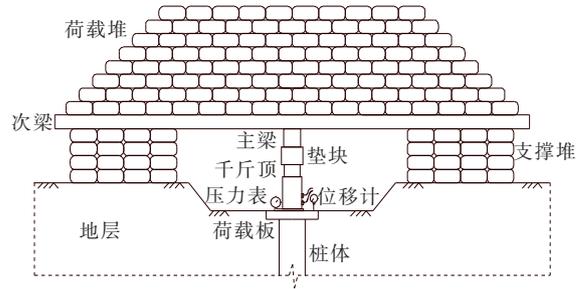


图 4 桩体静载加载示意图

2.2 旋喷桩隧道加固试验设计

在进入浅埋段隧道施工前须对隧道软弱地层进行高压旋喷桩加固试验。浅埋段左线 ZK84+645~ZK84+680 段和右线 K84+650~K84+680 段为隧道地层加固试验段。采用高压旋喷桩对隧道软弱地层进行加固处理,对加固前后的围岩强度与完整性、隧道洞周变形、支护结构受力及地层透水性进行监测。

加固试验前对地表植被、表层根植土及流塑状淤泥进行清理,并对淤泥进行开挖换填,进行施工场地平整。试验区域高压旋喷桩浆液压力为 22~24 MPa、提升速度为 18~22 cm/min、旋转速度为 20 r/min,桩间距 1.5 m,浆液水灰比为 1:1。隧道范围及洞周范围 6 m 采用 $\phi 50$ cm 高压旋喷桩加固(地表处理范围在线路左侧水塘范围适当加宽)。旋喷桩加固至隧道仰拱深度范围,桩体长度以穿过全风化软弱层为准,长度为 10~15 m。对地表进行加固处理后,按施工顺序进行浅埋段洞身施工。旋喷桩地层加固试验空间位置关系如图 5 所示。

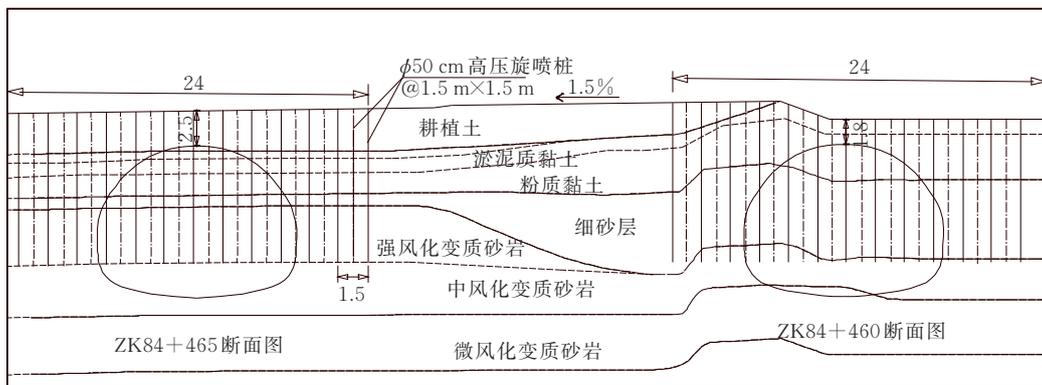


图 5 高压旋喷桩加固隧道地层试验布置图(单位:m)

3 试验结果分析

高压旋喷桩的旋喷参数需要结合工程现场地

质条件并参考相近工程经验数据确定,结合高压旋喷桩现场试验来验证^[11]。超浅埋隧道地层加固还要考虑隧道设计要求、最小埋深和施工安全性^[13-14]。

3.1 单桩静载试验

按照单桩静载试验要求增速逐级加载,直到达到设计荷载 300 kPa。不同喷浆压力(S-D1、S-D2、S-D3工况)、不同旋喷转速(S-R1、S-R2、S-R3工况)和不同提升速度(S-T1、S-T2、S-T3工况)时,单桩沉降曲线如图6~8所示,单桩试验数据统计见表3。

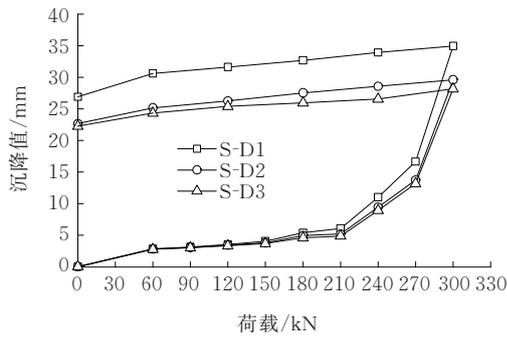


图6 不同喷浆压力下单桩沉降曲线

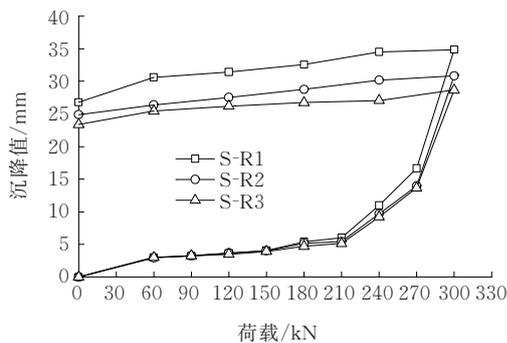


图7 不同喷嘴转速下单桩沉降曲线

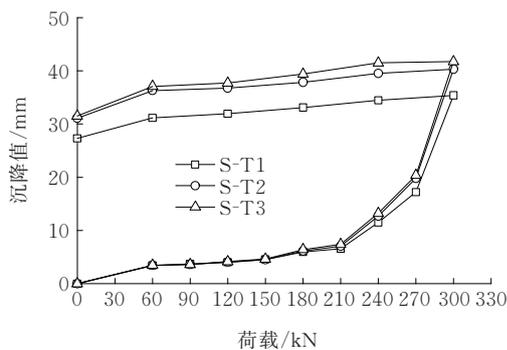


图8 不同提升速度下单桩沉降曲线

由图6~8及表3可知:

(1) 浆液压力对单桩静载承载力有明显影响,浆液压力越大,相同静载条件下,单桩累计沉降值越低。当喷浆压力从 20 MPa 增加至 22 MPa 时,最大设计荷载条件下,单桩累计沉降值降低了 5.37 mm,回弹量减小了 1.12 mm。当浆液压力从 22 MPa 增加

表3 单桩静载试验数据统计表

工况 编号	不同荷载值(kN)的桩顶沉降/mm				回弹量/ mm	回弹比 例/%
	60	180	300	0(卸载)		
S-D1	2.85	5.38	34.97	26.90	8.07	23.1
S-D2	2.80	4.91	29.60	22.65	6.95	23.5
S-D3	2.78	4.61	28.18	22.25	5.93	21.0
S-R1	3.02	5.42	34.87	26.79	8.08	23.2
S-R2	2.95	5.16	30.85	24.90	5.95	19.3
S-R3	3.01	4.69	28.69	23.38	5.31	18.5
S-T1	3.43	5.95	35.40	27.32	8.08	22.8
S-T2	3.49	6.13	40.34	31.13	9.21	22.8
S-T3	3.47	6.43	41.76	31.53	10.23	24.5

至 25 MPa 时,最大设计荷载条件下单桩累计沉降值降低了 1.42 mm,回弹量减小了 1.02 mm,累计沉降值变化率降低,回弹量变化量基本相同。

(2) 当旋喷转速从 18 r/min 增加至 20 r/min 时,最大设计荷载条件下,单桩累计沉降值降低了 4.02 mm,回弹量减小 2.13 mm。当旋喷转速从 20 r/min 增加至 22 r/min 时,最大设计荷载条件下单桩累计沉降值降低了 2.16 mm,回弹量减小 0.64 mm。旋喷转速对单桩静载承载力有明显影响,旋喷转速越大,相同静载条件下,单桩累计沉降值越低。随着旋喷转速的增加,单桩累计沉降值变化率减小,回弹量变化率也减小。

(3) 当提升速度从 20 cm/min 增加至 25 cm/min 时,最大设计荷载条件下,单桩累计沉降值增加了 4.94 mm,回弹量增加 1.13 mm。当提升速度从 25 cm/min 增加至 30 cm/min 时,最大设计荷载条件下单桩累计沉降值增加了 1.42 mm,回弹量增加 1.02 mm。旋喷转速对单桩静载承载力有明显影响,浆液压力越大,相同静载条件下,单桩累计沉降值越高。随着提升速度的提高,增加相同的提升速度,累计沉降值增加量减小,回弹量变化率基本保持不变。单桩承载力特征值(表4)的试验结果统计进一步验证了上述变化规律。

表4 单桩承载力特征值 R_a

桩号	R_a /kN	桩号	R_a /kN
D1	216.9	R3	225.2
D2	224.2	T1	213.8
D3	227.3	T2	210.6
R1	217.1	T3	208.8
R2	222.4		

3.2 复合地基静载试验

为了确定超浅埋地层通过高压旋喷桩加固处理后的承载力及变形特性,对试验桩进行单桩复合地基荷载试验。根据平板荷载试验所得数据,得到荷载-沉降曲线如图9~11所示。

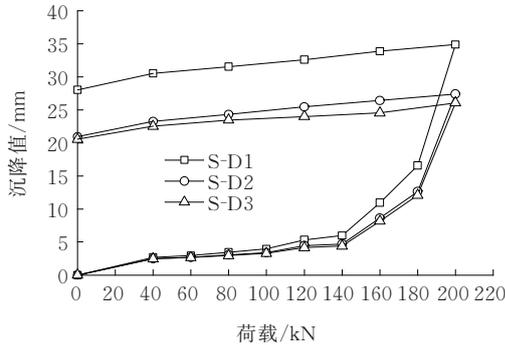


图9 不同喷浆压力下复合地基沉降曲线

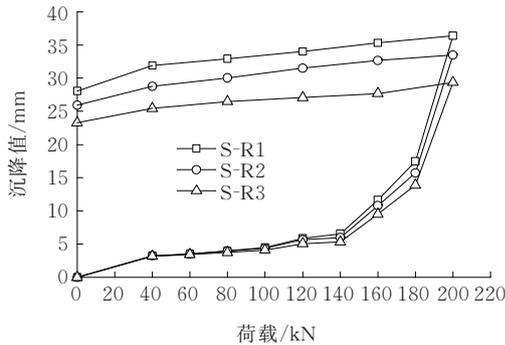


图10 不同喷嘴转速下复合地基沉降曲线

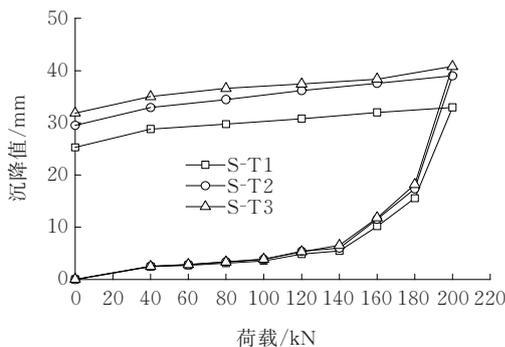


图11 不同提升速度下复合地基沉降曲线

由图9~11可知:单桩荷载试验和复合地基荷载试验在静载作用下具有一致的变化规律。荷载-沉降曲线加载过程可以划分为3个阶段,即缓慢变化阶段、加速变化阶段和急速变化阶段。在缓慢变化阶段中,随着荷载的提高,加固后的复合地层逐渐压实,空隙率减小;在加速变化阶段,受加载影响范围内的土体逐渐发生局部剪切破坏,变形模量减小,变形速率提高;在急速变化阶段,加载范围内的土体由

局部剪切破坏发展为全面剪切破坏,剪切面贯通,变形速率达到最大。

依据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2003)^[13]的规定,结合试验所得的静载-沉降曲线和变形特性如表5所示,得到单桩复合地基承载力特征值 f_{spk} 如表6所示。

表5 复合地基静载试验数据统计

工况编号	不同荷载值(kN)的地基沉降/mm				回弹量/mm	回弹比例/%
	60	180	300	0(卸载)		
S-D1	2.68	5.31	34.90	28.03	6.87	19.7
S-D2	2.48	4.44	27.40	20.94	6.46	23.6
S-D3	2.46	4.16	26.08	20.57	5.51	21.1
S-R1	3.26	5.87	36.37	28.05	8.32	22.9
S-R2	3.24	5.65	33.46	25.92	7.54	22.5
S-R3	3.19	5.08	29.37	23.26	6.11	20.8
S-T1	2.43	4.84	32.95	25.28	7.67	23.3
S-T2	2.51	5.38	38.97	29.51	9.46	24.3
S-T3	2.52	5.28	40.81	31.87	8.94	21.9

注:静载从设计最大荷载降至0之后的沉降量等同于残余沉降量。

表6 单桩复合地基承载力特征值 f_{spk}

桩号	f_{spk}/kN	桩号	f_{spk}/kN
D1	144.9	R3	148.9
D2	152.7	T1	147.3
D3	154.8	T2	144.3
R1	142.5	T3	142.4
R2	145.1		

3.3 钻孔取芯试验

高压旋喷桩试验桩成桩14 d后,对旋喷桩试验桩进行钻孔取芯。钻孔深度1.5~7.5 m为水泥土混合层,呈灰白色,色泽较均匀,有气泡。通过对高压旋喷桩取芯分析,发现旋喷桩冒浆高度基本在强风化变质砂岩层以上,冒浆部位所处地层主要为松散的粉质黏土层和含砂层。旋喷桩开挖后发现,旋喷桩桩顶最大冒浆高度为0.8 m,水泥土强度不高。桩体水泥土较均匀,强度较高且脆。旋喷桩施工完成后,经取芯验证,成桩质量良好,桩径为60~75 cm,达到设计要求,起到了固结隧道拱顶以上软弱土层的作用,为隧道浅埋段安全开挖创造了条件。

3.4 隧道地层加固试验

(1) 围岩完整性及围岩变形

浅埋试验段经过高压旋喷桩地层加固后隧道上

台阶存在桩体,桩体之间土体水泥含量较高,土体整体性较好,桩间存在挤密效应,与高压旋喷桩加固深度范围以外土体相比,强度得到较大提高。由于经过高压旋喷桩地层加固,桩体对土层起到支挡作用,限制土层侧向位移,隧道侧向收敛较小,说明高压旋喷桩抗挤出作用明显。

(2) 支护结构受力与围岩孔隙水压力

根据现场监测结果,围岩压力在开挖完成及支护初期,围岩应力释放较快,压力变化较快,后期变化较慢,最终稳定在6 kPa左右,处于合理范围内;钢拱架应力前期发展较快,后期钢拱架的受力逐渐趋于平衡,拱架最大内力稳定在0.3 MPa,在钢拱架设计允许范围内;地表沉降稳定,沉降量在设计允许范围内;地层孔隙水压力稳定在5 kPa。综合分析,隧道浅埋段在高压旋喷桩地表加固后支护结构受力变形在设计允许范围内,地层孔隙水压力极大降低,高压旋喷桩可以有效减小浅埋段支护结构的受力和变形,降低围岩孔隙水压力。根据开挖情况,在高压旋喷桩加固深度范围内,不存在大面积地层透水,上台阶施作初支段,初支表面较干燥,地下水主要在中台阶两侧流入隧道从排水沟内排出。

综上所述,经过高压旋喷桩底层加固后,超浅埋隧道开挖后顶部围岩较稳定,围岩间裂隙被水泥浆液填充固结,围岩强度、完整性提高;上台阶掌子面渗水量较小,地下水基本沿两侧拱脚流出,桩体起到了一定的止水作用;根据监控测量结果可知,浅埋段地表沉降在合理范围内,初支-围岩压力较小,地层孔隙水压力较小,高压旋喷桩加固提高围岩整体性,隧道开挖时围岩自稳能力得到有效发挥,说明地表高压旋喷桩起到了很好的加固作用。

4 结论

(1) 相同静载条件下,浆液压力越大,单桩累计沉降值越低,累计沉降值变化率降低,回弹量变化量基本相同;旋喷转速越大,单桩累计沉降值越低,随着旋喷转速的增加,单桩累计沉降值变化率减小,回弹量变化率也减小;随着提升速度的提高,增加相同的提升速度,累计沉降值增加量减小,回弹量变化率基本保持不变。

(2) 旋喷桩冒浆高度基本在强风化变质砂岩层

以上,冒浆部位所处地层主要为松散的粉质黏土层和含砂层。旋喷桩桩顶最大冒浆高度为0.8 m。桩体水泥土较均匀,强度较高且脆。成桩质量良好,桩径为60~75 cm,达到设计要求,起到了固结隧道拱顶以上软弱土层的作用。

(3) 经过高压旋喷桩加固后,围岩间裂隙被水泥浆液填充固结,围岩强度、完整性提高;上台阶掌子面渗水量较小,地下水基本沿两侧拱脚流出,桩体起到了一定的止水作用。高压旋喷桩加固提高围岩整体性,隧道开挖时围岩自稳能力得到有效发挥,说明地表高压旋喷桩起到了很好的加固作用。

参考文献:

- [1] 林锦腾,邱洪志,王永祯.山岭隧道超浅埋段开挖围岩变形分析[J].科学技术与工程,2020,20(24):9982-9987.
- [2] 范子中,周德泉,陈坤,等.旋喷桩复合地基承载力及其P-s曲线拟合分析[J].中外公路,2008,28(6):32-35.
- [3] 陈林杰,梁波,王国喜.浅埋暗挖超大断面地铁车站隧道开挖方法研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(4):928-933.
- [4] 孔恒.城市地铁隧道浅埋暗挖法地层预加固机理及其应用研究[D].北京:北方交通大学,2003.
- [5] 郑宏,方晓峰.粉煤灰地层浅埋大断面连拱隧道预加固方式研究[J].交通节能与环保,2021,17(3):140-142.
- [6] 冯波.地表高压旋喷桩加固技术在新屋隧道浅埋段的应用研究[J].公路交通技术,2021,37(4):113-118.
- [7] 王延宁,蒋斌松,于健,等.港珠澳大桥岛隧结合段高压旋喷桩地基沉降试验及研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(6):1514-1521.
- [8] 任伟新.高压旋喷桩在饱和动态含水砂层浅埋暗挖隧道中的试验与应用探讨[J].铁道标准设计,2009,53(7):83-87.
- [9] 阙寿洪.高压旋喷桩在隧道围岩加固中的应用[J].公路交通技术,2009,25(2):130-133.
- [10] 欧阳林,杨双发,张东明.高压旋喷桩联合袖阀管注浆加固法下盾构隧道施工过程路基沉降影响分析[J].铁道勘察,2016,42(4):64-67.
- [11] 潘华林,钱和平,蔡泽恩,等.高压旋喷桩加固高灵敏软土地基现场试验研究[J].地基处理,2021,3(1):71-75.
- [12] 李小杰.高压旋喷桩复合地基承载力与沉降计算方法分析[J].岩土力学,2004,25(9):1499-1502.
- [13] 中国建筑科学研究院.建筑基桩检测技术规范:JGJ 106—2003[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [14] 建设部综合勘察研究设计院.岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S].2009年版.北京:中国建筑工业出版社,2009.