

真空联合堆载预压法用于软基处理的效果分析

旷才植

(长沙市长东投资发展有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要:以某市政道路深厚软土路基处理为工程背景,通过现场试验和相关理论研究,提出真空联合堆载预压处理软土路基的施工方案,介绍了其技术要点,并对处理后效果进行检测试验,对加固前后相关指标进行对比分析。结果显示,经真空联合堆载预压处理后,软土路基孔隙率降低、压实度提高,达到施工质量标准。

关键词:公路;市政道路;软土路基;真空联合堆载预压法

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2020)04-0079-06

地基变形、地基刚度、稳定性、湿陷性等技术指标都影响市政道路的工程质量。由于市政道路大都处于城市发展控制区域内,受周边建筑物影响,其对路基差异沉降、整体稳定性、工后沉降控制都有更加严格的要求。某市政道路施工中,采用真空联合堆载预压法对软土路基进行处理。

1 工程概况

该市政道路属剥蚀残丘地貌,主要出露地层为二叠系、石炭系、奥陶系,其下软土地基大面积分布,多属不稳定路段。部分路段山体裸露,风化严重,较破碎;少部分路段原始地基良好,为强风化~中风化花岗岩层,可直接采用原始地基。该项目路线全长 3.30 km。主要参数如下:1) 设计等级。城市次干路,Ⅰ级公路标准。2) 设计速度为 40 km/h。3) 新建公路红线范围为 30 m。4) 设计荷载。设计年限内,每车道累计轴次标准为 1×10^7 次;100 kN 双轮组单轴。5) 地震动峰值加速度为 0.10g。6) 车道宽度。双向四车道, $0.5 \text{ m} + (2 \times 3.5 + 0.5 + 2 \times 3.5) \text{ m} + 0.5 \text{ m} = 15.5 \text{ m}$ 。

1.1 地质条件

对该道路进行地质勘查,按 40 m 间距布置勘测点。对可塑~硬塑土层,勘探深度为 3~5 m;对软塑土层,勘探深度为 8 m 左右;对软土、可液化土层、回填土层,勘探深度贯穿整个土层。实际勘测时,根据实际地层、实际埋深、实际地质条件进行勘探方案动态调整。根据勘探结果,该区域场地内地层主要为湖区残积层、填筑土层、花岗岩层。

1.2 软土地基固结特性试验分析

该项目场地软土层呈现外露、水覆盖、上部杂填

土覆盖等多种形式,根据室内土工试验和现场勘测结果,淤泥质土体的超固结比 $OCR < 1$,为欠固结土。由于不同深度软土层表现的物理力学性质有所差异,对无覆盖层的软土层勘测其压缩指数及不同深度变化情况。

1.2.1 试验方法

软土固结试验按 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》进行,试验时间为一周。为验证该方法的可操作性,进行按次固结增量的平行比对试验。

1.2.2 试验结果分析

(1) 软土地基上部无杂填土覆盖时,前期压力与压缩指数在不考虑淤泥埋置深度时为 $P_c = 48 \text{ kPa}$ 、 $C_c = 0.590$;存在淤泥时,按埋置深度调整前期压力与压缩指数取值,0~12 m 时 $P_c = 38 \text{ kPa}$ 、 $C_c = 0.559$,超过 12 m 时 $P_c = 56 \text{ kPa}$ 、 $C_c = 0.616$ 。

(2) 软土地基上部有杂填土覆盖时,前期固结压力与压缩指数根据覆土厚度取值,厚度小于 2 m 时按无覆盖填土确定,厚度为 2~4 m 时 $P_c = 57 \text{ kPa}$ 、 $C_c = 0.552$,厚度超过 7 m 时 $P_c = 75 \text{ kPa}$ 、 $C_c = 0.570$,并根据现场地质勘探报告进行动态调整。

2 软土路基处理方案设计

2.1 常用软土地基改良方案

天然地基存在承载力小、沉降差异大、强度低、易变形等问题,需将其处理为人工复合地基才可进行道路铺筑。根据多年研究及工程实际检验,真空联合堆载(超载)预压、水泥搅拌桩、高压旋喷桩、抛石挤淤、水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)等都是处理软土地基的有效方法。这些方法主要分为排水固结法和桩体复合地基法两种形式,各自特点见表 1。

表1 常用较厚软土地基处理方法对比

方案类别	处理工艺	优点	缺点
排水固结法	堆载预压试验	承载力提高;残余沉降降低;整体性能较好	施工周期长;沉降量较大;失稳现象频繁
	真空联合堆载预压	处理过程中稳定性易保证;工期较短,约6个月;处理后残余沉降小	软土层中有夹砂层时,容易漏气;施工中沉降量较大
桩体复合地基法	水泥搅拌桩	承载力提高;残余沉降降低;整体性能较好,处理效果好	处理深度一般不超过15 m;质量控制稳定性差
	CFG桩	CFG桩承担填土荷载,稳定性好,差异沉降小,处理效果好	处理深度超过25 m时,造价较高
	刚性桩	刚性桩承担填土荷载,沉降量小,处理效果佳	主要用于埋深较大的管线基础

2.2 加固软基处理方案设计

2.2.1 加固软基方案选择

该项目受道路两侧市政管线及周边建筑物的制约,作业面相对狭小,故选用排水固结法处理软土地基。排水固结法两种施工工艺中,堆载预压法的施工周期比真空联合堆载预压法多一倍,而处理的土方量多1.6~1.7倍。结合该项目施工周期短、土石方缺乏、资金紧张等因素,选择真空联合堆载预压法处理试验段软土地基。

采用真空联合堆载预压法处理试验段软基,在真空负压作用下,路基侧向位移呈向内收敛趋势。填筑过程中为保证黏土密封墙的密封性,其膜下真空度不低于80 kPa(只有保证真空度压力,软土地基内的孔隙水才能快速排出)。试验段检测结果显示,处理后地基土层均匀密实,在行车荷载等作用下未出现波浪形病害,变形较均匀。基坑开挖时也未出现反涌现象,土坡稳定性好,工程费用较低。

2.2.2 真空联合堆载预压法加固软基机理

真空预压法主要通过砂垫层和竖向排水井与地

基土产生的大气压差对软土地基中的孔隙水进行竖向渗流,从而降低孔隙水压力、提高有效应力,提高软土地基承载力、降低工后沉降。施工时需将砂井或塑料排水板埋入软基内,然后在地面铺设砂垫层,用真空装置对垫层中的滤水孔管道进行抽气而产生压力差排水。堆载预压主要通过堆载引起的孔隙水压力差变化对软弱土体进行加固。真空预压或堆载预压可增大加固软弱土与排水体之间的孔隙水压力差变化和叠加变化,加固更稳定,同时增加软土地基内部分附加应力,工后沉降量小。由于堆载排水预压法和真空排水预压法的工作原理相同,两者联合使用可同时发挥各自的优势,大大增加软基内部分附加应力,同时提高荷载的加荷速率,加固深度大,施工周期缩短,工后沉降降低。

2.2.3 真空联合堆载预压处理方案设计

该项目采用真空联合堆载预压处理一般路段的软基(见图1),山体过渡段采用真空联合堆载预压后打设水泥搅拌桩,降低其后期差异沉降。将塑料排水板作为排水通道打入软土地基中,在其上方铺

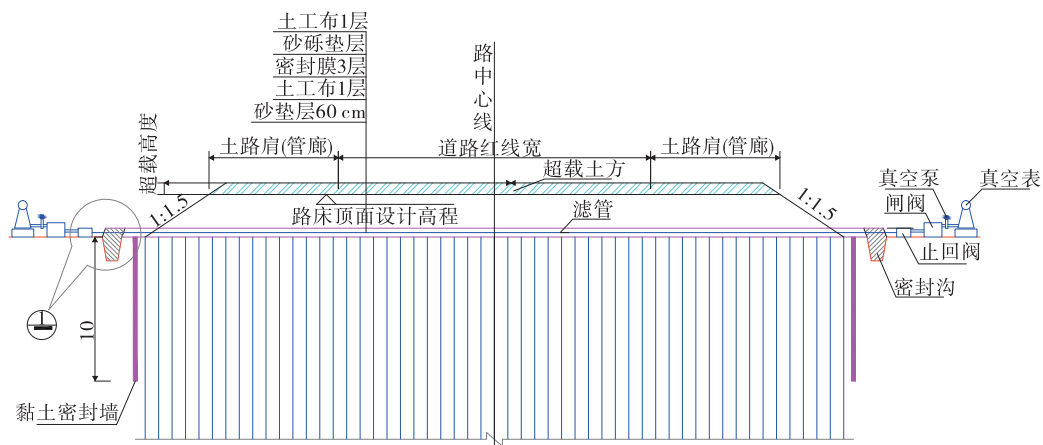


图1 真空联合超载预压处理典型断面(单位:cm)

筑滤管和砂垫层便于横向排水,再在其上方填筑土方荷载,加速软土路基中孔隙水排放。

(1) 真空联合堆载预压施工时,真空预压荷载不低于 80 kPa。采用 C 型非再生塑料排水板,打入 18~25 m 软土地基中,排水板间距为 1 m,呈正方形布设。

(2) 黏土密封墙作为真空联合堆载预压的真空分区层,采用直径为 700 mm、搭接宽度 200 mm 的双轴深层搅拌桩及“四搅四喷”的施工方法,为保证真空效果,密封墙搭接宽度不小于 1.2 m。

(3) 吹填面由 60 cm 砂垫层、1 层土工布、3 层密封膜组成。为保证真空膜的真空效果,在其上方铺设 50 cm 中粗砂垫层和 1 层土工布。

(4) 排水固结处治段和山体处治段设置 30 m 过渡段,以减小二者在运营后期产生的差异沉降。其中排水固结处治段桩号为 GK0+74—GK1+410、GK1+220—420,处置段内铺筑 2 m 高填土。

(5) 主要材料要求。砂垫层采用不含有机质、黏土块且透水性良好的砂,含泥量小于 5%;土工布为 200 g/m² 无纺土工布;密封膜采用聚乙烯或聚氯乙烯薄膜;主管为高强度塑料管,直径 $\phi 75$ mm,壁厚 3.5~4.0 mm;滤管采用高强柔性塑料管,直径 $\phi 50$ mm,壁厚 3.5~4.0 mm,滤管上打孔,并外包 200 g/m² 渗水土工布;塑料排水板的板芯材料不得含再生塑料,其性能指标见表 2。

表 2 塑料排水板的性能指标

项目	性能指标	条件
未弯曲段的纵向通水量/(cm ³ ·s ⁻¹)	>70	—
人工弯曲段的纵向通水量/(cm ³ ·s ⁻¹)	>50	—
过滤薄膜的渗透系数/(cm·s ⁻¹)	$\geq 5 \times 10^{-4}$	试件需在水中浸泡 24 h
过滤薄膜的等效孔径/mm	<0.075	—
排水板的抗拉强度/[kN·(10 cm) ⁻¹]	≥ 2.3	延伸率为 10% 时
过滤薄膜的干态抗拉强度/(N·cm ⁻¹)	≥ 30	延伸率为 10% 时

3 真空联合堆载预压的施工工艺

3.1 工艺流程(见图 2)

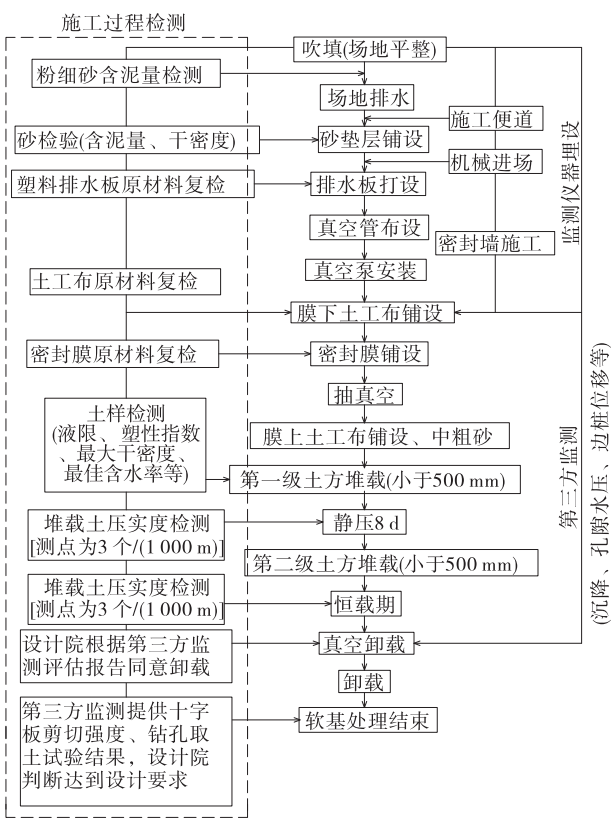


图 2 真空联合堆载预压的施工工艺流程

3.2 加荷步骤(见表 3)

表 3 真空联合堆载预压荷载施加步骤

施加的荷载	填筑路基 累计高度	荷载施加 历时/d
第 1 级:真空加载(荷载值>0.08 MPa)	—	10
第 2 级:填筑路堤(0~3 m)	不大于 3 m	15
第 3 级:填筑路堤(3~5 m)	路床设计高度	20
第 4 级:超载预压(0~2 m)	5 m~超载预压高度	15
满载预压	预压施工高度+沉降补方	90+30
卸载(真空)	停泵 3 次,单次停泵数为总泵数的均值	6
卸载(超载土方)	路床设计高度	10

3.3 填筑速率控制

(1) 严格控制堆载填筑速率,保证荷载均匀递增,防止真空联合堆载预压过程中荷载陡增引发土体失稳。根据荷载施加步骤,对加载阶段的沉降率、侧位移及孔压力值进行监控,控制标准见表 4。整个填筑阶段,各参数需始终处于标准范围内。一旦

参数指标超标,立即停止填筑堆载,并提高监测频率和精度,加派监测人员,直至参数值趋于稳定并经设计方同意后方可继续施工。

表4 各参数的控制标准

参数	控制标准
沉降速率	竖向沉降量不大于 20 mm/d
边桩位移值	侧向位移不大于 5 mm/d
孔压力值	超孔隙水压力/荷载增量不大于 0.6

(2) 在真空联合堆载预压施工阶段,受到内部真空环境扰动,土体横向位移发展方向向内,需切断电源或持续超厚加载,方可产生反方向变形。现场实践发现竖向沉降速率控制标准放宽至 30 mm/d 能保证填筑的稳定性,故可以 30 mm/d 作为竖向沉降速率控制标准。

3.4 堆载填土施工技术

(1) 堆载填土层摊铺前,测定其含水率,保证含

水率与最佳含水率的偏差不超过 2%。以最佳含水量为控制参数,含水量不能偏大,稍小有利于压实。

(2) 松铺厚度及松铺系数。路基填筑平均松铺厚度为 300 mm,松铺系数为 1.2,满足规范要求。

(3) 碾压机械组合及遍数。采用山推 R22M 振动压路机,先静压 1 遍,再小频率振动 2 遍、高频率振动 4 遍、收面压实 1 遍。根据标段长度确定检测截面,单个截面上均匀布置 2 个测点(见图 3),及时观测并采集压实度(见表 5)。高频率振动压实 5 遍,即碾压 9 遍后,压实度趋于稳定。



图3 堆载填土层压实度检测断面布置

表5 堆载填土层压实度检测结果

碾压 遍数/遍	压实度检测结果/%						平均压实度/%
	1	2	3	4	5	6	
1	78.50	78.86	79.21	78.64	79.14	78.65	78.85
2	84.25	85.94	83.79	84.54	84.25	83.90	84.45
3	89.15	89.20	88.98	88.75	89.25	89.32	89.12
4	90.88	91.23	91.22	90.98	91.42	90.88	91.11
5	92.85	93.40	93.13	93.06	92.88	93.22	93.10
6	94.36	94.20	94.15	94.50	94.18	94.21	94.27
7	95.15	95.31	95.43	95.13	95.32	95.25	95.27
8	96.18	95.93	96.25	96.33	95.90	96.24	96.15
9	96.70	96.86	96.90	96.96	97.22	96.92	96.93
10	96.99	97.23	96.97	97.18	97.22	97.16	97.13
11	97.22	97.34	97.28	97.40	97.22	97.16	97.37

4 真空联合堆载预压法加固效果分析

4.1 加固效果检测方法

为论证真空联合堆载预压技术处理软基的效果,在 GK1+600、GK2+800 断面进行检测。检测方法如下:

(1) 十字板剪切试验。以十字板剪力仪作为剪切试验仪器,将十字板匀速压入待测定位置深度,向钻杆施加扭转力矩,扭转力矩以测试头能匀速转动为准,测定对应工况下扭转力矩值,扭转至土体被剪切破坏。十字板试验位置为检测断面靠近中间位置,十字板与取土孔之间的间距控制在 4~5 m。软土层内的十字板剪切试验按每米试验 1 次,试验过

程中伴随灵敏度试验。

(2) 钻孔取土。为测定不同深度的处治成效,钻孔取样进行室内试验,取样间距取 2 m。选用薄壁取样仪器,内径为 110 mm,长度为 200 mm。

4.2 试验时间

(1) 十字板抗剪强度试验。加固前的十字板抗剪强度试验在支设塑料排水板之后开展;加固后的十字板抗剪强度试验,GK1+600 和 GK2+800 分别在真空卸载后第 22、28 d 进行。

(2) 钻孔取土及室内试验。加固前的钻孔取土及室内试验在支设塑料排水板之后开展;加固后的钻孔取土及室内试验,GK1+600 和 GK2+800 分别在真空卸载后第 25、30 d 进行。

4.3 试验结果分析

加固前后十字板剪切试验结果见表 6,土样含

水率、孔隙比检测结果分别见表 7、表 8,直剪粘聚力试验结果见表 9,土层土质情况见表 10、表 11。

表 6 加固前后十字板剪切试验结果

断面位置	原状土抗剪强度平均值/kPa		重塑土抗剪强度平均值/kPa		灵敏度	
	处治前	处治后	处治前	处治后	处治前	处治后
GK1+600	12.41	44.64	4.58	15.01	2.72	2.98
GK2+800	8.79	47.48	3.36	14.66	2.97	3.27

表 7 处治前后土样含水率检测结果

试验深度/m	GK1+600 断面		GK2+800 断面	
	含水率/%		含水率/%	
	处治前	处治后	处治前	处治后
1.8~2.0	56.5	21.2	—	16.6
3.8~4.0	62.8	—	57.6	—
5.8~6.0	48.2	42.3	65.7	46.4
7.8~8.0	66.8	41.4	66.8	39.7
9.8~10.0	66.5	44.1	64.3	43.2
11.8~12.0	57.6	44.8	69.5	49.2
13.8~14.0	60.5	47.8	60.7	52.1
15.8~16.0	—	—	58.6	52.7

表 8 处治前后土样孔隙比检测结果

试验深度/m	GK1+600 断面		GK2+800 断面	
	孔隙比		孔隙比	
	处治前	处治后	处治前	处治后
1.8~2.0	1.513	0.628	—	0.557
3.8~4.0	1.663	—	1.588	—
5.8~6.0	1.290	1.128	1.780	1.141
7.8~8.0	1.811	1.107	1.763	1.084
9.8~10.0	1.812	1.196	1.767	1.253
11.8~12.0	1.531	1.245	1.881	1.373
13.8~14.0	1.642	1.371	1.672	1.485
15.8~16.0	—	—	1.706	1.505

表 9 处治前后直剪粘聚力试验结果

试验深度/m	GK1+600 断面		GK2+800 断面	
	粘聚力/kPa		粘聚力/kPa	
	处治前	处治后	处治前	处治后
1.8~2.0	4.5	—	—	—
3.8~4.0	3.6	—	4.4	—
5.8~6.0	13.6	12.8	4.8	11.7
7.8~8.0	5.8	10.6	6.3	7.8
9.8~10.0	2.8	8.0	5.8	7.6
11.8~12.0	5.8	17.5	6.6	7.2
13.8~14.0	6.1	6.1	7.6	4.1
15.8~16.0	—	—	6.1	8.5

由表 6~11 可知:1) GK1+600 截面十字板试验强度均值为 12.41 kPa,处治后强度均值提高到 44.64 kPa,提高约 2.5 倍;土体含水率由处治前的均

表 10 GK1+600 处治前后土体土质情况对比

软弱土层	处治前土质	处治深	处治后土质
深度/m	判断结果	度/m	判断结果
1.8~2.0	淤泥质层	1.7~1.9	粉质黏土层
3.8~4.0	淤泥质层	3.7~3.9	粉砂层
5.8~6.0	淤泥粉质黏土层	5.7~5.9	淤泥粉质黏土层
7.8~8.0	淤泥质层	7.7~7.9	淤泥质粉质黏土层
9.8~10.0	淤泥质层	9.7~9.9	淤泥质粉质黏土层
11.8~12.0	淤泥质层	11.1~11.9	淤泥质粉质黏土层
13.8~14.0	淤泥质层	13.7~13.9	淤泥质粉质黏土层

表 11 GK2+800 处治前后土层判断对比分析结果

软弱土层	处治前土质	处治深	处治后土质
深度/m	判断结果	度/m	判断结果
1.8~2.0	中砂层	1.7~1.9	粉质黏土层
3.8~4.0	淤泥质层	3.7~3.9	粉砂层
5.8~6.0	淤泥质层	5.7~5.9	淤泥粉质黏土层
7.8~8.0	淤泥质层	7.7~7.9	淤泥粉质黏土层
9.8~10.0	淤泥质层	9.7~9.9	淤泥粉质黏土层
11.8~12.0	淤泥质层	11.1~11.9	淤泥粉质黏土层
13.8~14.0	淤泥质层	13.7~13.9	淤泥粉质黏土层
15.8~16.0	淤泥质层	15.7~15.9	淤泥质粉质黏土层

值 59.8%下降至处治后的均值 42.6%,下降 28%以上;土体孔隙比由处治前的均值 1.612 下降至处治后的 1.179,下降 27%;直剪粘聚力从处治前的均值 5.7 kPa 提高到处治后的 10.2 kPa,增幅约 79%。2) GK2+800 截面十字板试验强度均值为 8.79 kPa,处治后强度均值提高至 47.48 kPa,提高约 4.4 倍;土体含水率由处治前的均值 63.4%下降至处治后的均值 44.6%,下降约 30%;土体孔隙比由处治前的均值1.744下降至处治后的 1.257,下降约 28%;直剪粘聚力从处治前的均值 6.1 kPa 提高到处治后的 8.4 kPa,增幅约 38%。通过真空联合堆载预压处治后,软土路基的强度明显提高,含水率显著下降,整体固结效果明显;经长期预压处治的淤泥质黏土的强度显著提升,原状土的十字板抗剪强度大幅

提升。经真空联合堆载预压处治后软土路基的各项路用性能均满足设计及规范要求。

4.4 加固前后沉降量分析

软基处理期间卸载区沉降观测数据见表12。

表12 卸载区沉降观测数据

桩号	淤泥深度/m	施工期间 沉降量/m	沉降量与淤泥 深度之比
CK1+400—800	14.0	1.12	0.080
CK2+500—900	16.0	1.20	0.075

5 结论

(1) 真空联合堆载预压施工中,受真空环境影响,土体横向位移向内收敛,切断电源或持续超厚加载才会产生反方向变形。GK1+600、GK2+800断面软弱土层处理的最深处为16 m,通过现场观测及实践总结,弱软土层处理深度 ≤ 16 m时,竖向沉降速率控制标准可设为 ≤ 30 mm/d。

(2) 通过真空联合堆载预压处治后,GK1+600、GK2+800断面的强度指标分别增长2.5、4.4倍,土体含水率分别降低28%、30%,孔隙比分别降低27%、28%,粘聚力分别增长79%、38%,软土路基的排水固结成效和各项路用性能指标均满足设计及规范要求。

(3) 淤泥深度在16 m以内时,真空联合堆载预压法施工期间的沉降量设计值可按淤泥深度的8%进行修正。该项目路面施工完毕后,经过6个月的跟踪观测,路表最大总沉降量为1 cm左右,沉降发展极其缓慢,满足规范要求。

(4) 真空联合堆载预压法实施过程中对周边土层影响较大,可能造成已建基础设施损坏,应加强对周边设施的保护,并分析特定环境的可行性。

(5) 真空联合堆载预压法的费用比传统堆载预压法稍高,但可缩短建设工期、保障工程质量,值得

推广应用。

参考文献:

- [1] 饶纪锋,王潇潇.综合评判法在软基处治优化设计中的应用[J].公路与汽运,2010(4):117—118+148.
- [2] 李海涛,章定文,孙文博.劈裂真空预压法在阜建高速公路软基处理中的应用[J].公路与汽运,2015(2):132—136.
- [3] 刘皓琨.京台高速公路软基处理对比分析[J].公路与汽运,2015(1):102—105.
- [4] 熊娟,邓新征.软基固结沉降规律理论研究[J].湖南交通科技,2016,42(2):41—43+220.
- [5] 问建学,丁强,陈松.FLAC^{3D}模拟真空联合堆载预压处理软土路基变形的研究[J].公路,2018(5):65—68.
- [6] 赵振平.深厚软土地基真空联合堆载预压法加固效果评价[J].公路,2014(4):38—43.
- [7] 王琰.真空联合堆载预压技术在公路工程施工中的应用[J].交通世界,2017(26):65—66.
- [8] 唐江龙.真空联合堆载预压法的设计及应用探讨[J].西部交通科技,2018(9):23—25.
- [9] 詹航海,黄文华,袁亚良.真空联合堆载预压技术在公路软土地基处理中的应用[J].浙江交通职业技术学院学报,2010,11(3):9—12+22.
- [10] 罗斌,强小兵.不同特征滤膜真空联合堆载预压结合排水强夯法处理吹填土的施工技术[J].广东交通职业技术学院学报,2019,18(3):10—15+67.
- [11] 罗斌,雷金山,唐晶.不同特征滤膜真空预压处理吹填土的模型试验研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(7):1420—1427.
- [12] 何长明,黎军.真空联合堆载预压法处理深厚软土试验研究[J].岩土工程技术,2019,33(2):115—120.
- [13] 王建华,刘志,丁小冬,等.新型真空预压法在堆场深厚软土地基处理中的应用[J].水运工程,2017(2):160—165.

收稿日期:2019—11—12

(上接第78页)

- [6] 杨西锋,尤哲敏,牛富俊,等.固化剂对盐渍土物理力学性质的固化效果研究进展[J].冰川冻土,2014,36(2):376—385.
- [7] 李作恒.石灰改良盐渍土路基工程特性试验研究[J].石家庄铁道学院学报(自然科学版),2007,20(2):45—48+114.
- [8] 陈雪峰.滨海地区水泥改良盐渍土强度特性及其机理研究[J].交通标准化,2012(6):51—54.

- [9] 余云燕,赵德安,彭典华,等.新疆铁路改良盐渍土无侧限抗压强度试验研究[J].兰州交通大学学报,2008,27(4):9—13.
- [10] 张登武,赖天文,方建生.改良盐渍土的工程特性试验研究[J].铁道建筑,2012(9):81—83.
- [11] 刘靖.电石灰改良滨海盐渍土路基工程特性研究[J].工程勘察,2010,38(11):17—20.

收稿日期:2019—09—10