

文章编号: 1674—8247(2018)02—0037—06

高烈度区盐湖软弱盐渍土地基加固关键技术

吴沛沛 陈伟志 丁兆锋

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:本文结合伊朗德黑兰至伊斯法罕高速铁路建设,以高烈度区 Hoze Soltan 盐湖并存的富盐盐渍土、深厚松软土、液化砂土等 3 种特殊岩土为对象,开展了软弱盐渍土地基加固方案比选及关键技术研究。结果表明:(1)从符合稳定性、承载力及沉降控制标准而言,桩网结构、桩筏结构、桩板结构均适用于 Hoze Soltan 盐湖软弱盐渍土地基加固;(2)综合对比施工条件、工程投资及业主要求,推荐了 CG 桩或预制桩桩网结构作为软弱盐渍土地基的加固方案;(3)进一步地在优化设计的基础上,研发了具有排盐、抗溶陷、抗盐胀及抗侵蚀的桩网结构,并提出了抗溶陷加筋垫层土工格栅拉力设计值的确定方法。研究结果可为高速铁路以长路基通过内陆大盐湖地基加固设计提供参考。

关键词:高烈度;盐湖;盐渍土地基;加固技术;高速铁路

中图分类号:U416

文献标志码:A

Key Technology of Soft Saline Soil Foundation Reinforcement of Saline Lake in High Intensity Area

WU Peipei, CHEN Weizhi, DING Zhaofeng

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Combined with the construction of Tehran-Isfahan high-speed railway in Iran, taking three kinds of special soils of Hoze Soltan saline lake in high intensity area as the objects, such as salt-rich saline soil, deep soft soil and liquefied sand, The comparison of reinforcement proposals of soft saline soil foundation and key technologies researches are carried out. The results indicate: (1) the pile-net structure, pile-raft structure and pile-slab structure can be used as foundation reinforcement of Hoze Soltan saline lake in accordance with the control standards of stability, bearing capacity and settlement; (2) comprehensive comparison of construction conditions, project investment and owner's requirements, the proposal of CG pile or precast pile-net structure is suggested to reinforce the soft saline soil foundation; (3) based on the optimized design, a pile-net structure with salt drainage, resist collapse, resist salt expansion and resist erosion is developed, and a methodology to calculate the tensile design value of reinforced geogrid to resist collapse is proposed. The research results can be used as a reference to design the soil foundation reinforcement of saline lake under long embankment of high-speed railway.

Key words: high intensity area; saline lake; saline soil foundation; reinforcement technology; high-speed railway

伊朗德黑兰至伊斯法罕高速铁路(以下简称“德伊高铁”)起于首都德黑兰,经库姆、得利坚、梅梅,终于伊斯法罕,全长约 405 km^[1];其中德黑兰~库姆段(以下简称“德库段”)为新建段,长约 160 km,大部分

按速度 300 km/h 无砟轨道设计;库姆~伊斯法罕段为在建段,长约 246 km,伊方已采用 UIC 标准、按速度 250 km/h 有砟轨道设计,并完成比例达 70% 的工程建设,后期工程设计将采用中国标准按速度 300 km/h 有

收稿日期:2017-04-19

作者简介:吴沛沛(1982-),男,高级工程师。

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2017G008-C)

引文格式:吴沛沛,陈伟志,丁兆锋. 高烈度区盐湖软弱盐渍土地基加固关键技术[J]. 高速铁路技术,2018,9(2):37-42.

WU Peipei, CHEN Weizhi, DING Zhaofeng. Key Technology of Soft Saline Soil Foundation Reinforcement of Saline Lake in High Intensity Area [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(2): 37-42.

砟轨道设计。德伊高铁是中国高速铁路“走出去”的首个在建工程,也是“一带一路”战略实施的重要组成部分。

德伊高铁穿越德冲洪积平原区(Ⅰ),盐湖湖积平原区(Ⅱ),沉积岩低山浅丘地貌区(Ⅲ)等地貌单元^[2]。德库段线路里程 DK 84+200~DK 103+000 以填方路基通过 Hoze Soltan 盐湖,长度约 19.8 km,按有砟轨道设计;段内盐湖成因为冲积、湖积作用,两端为戈壁滩过渡带,地表分布一层富集硫酸盐、亚硫酸盐、亚氯盐的盐壳层,下覆含盐松软土与级配不良砂,属于典型的盐渍土地基。

在盐渍土地基处理方面,国内外学者进行了大量的研究工作,如 Mikheev 等人^[3]研究了工业和民用建筑中盐渍土地基的服役性能;Nambiar 等人^[4]对印度西海岸细粒碳酸盐渍土工程性质进行了详细调查,分析了碳酸盐存在形式对细粒盐渍土地基工程性质的影响;Moayed 等人^[5]通过石灰和硅微粉进行盐渍土改良,并测定了改良土的承载能力(CBR)和无侧限抗压强度;黄晓波等人^[6]用砂井加漫灌的方式进行浸水预溶,有效地降低了地基土体的含盐量,并提高了地基土强度;张彧等人^[7]研究了强夯置换复合地基在察尔汗-格尔木高速公路青藏高原寒区和盐湖区的应用,并评价了强夯置换复合地基的桩土工作机理及沉降折减问题;岳浩森等人^[8]通过室内模拟试验,研究了温度、含盐量、含水率、最小孔隙比等因素对砂类硫酸盐渍土试样膨胀的影响规律,探讨了换填覆重垫层设计的量化方法。

然而,目前针对高速铁路盐渍土地基研究成果较少,特别是类似于 Hoze Soltan 富盐软弱盐湖区的地基加固的论述更是缺乏。本文结合伊朗德伊高铁建设,研究了高烈度区 Hoze Soltan 盐湖软弱盐渍土地基加固关键技术。

1 工程概况及设计指标

1.1 工程概况

Hoze Soltan 盐湖段内新建铁路路基填高为 2.2~3.9 m,基底分布一层富集硫酸盐、亚硫酸盐、亚氯盐的盐壳层,如图 1 所示,厚度为 0.5~1.8 m;盐壳层下覆含盐松软土与级配不良砂,厚度大于 70 m。测区地震动峰值加速度为 0.30 g,属高烈度地震区,饱和级配不良砂存在液化的可能;地下水中 SO_4^{2-} 的盐类结晶破坏环境作用等级为 Y3;水中氯盐环境作用等级为 L3;水中 SO_4^{2-} 的化学侵蚀环境作用等级为 H3。

该工点为国内外高速铁路中首个以长路基通过内陆大盐湖富盐软弱地基以及高烈度地震区的路基工

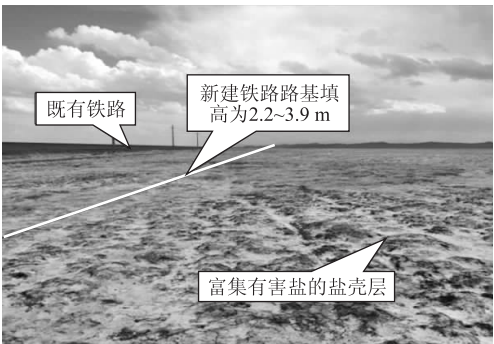


图1 Hoze Soltan 盐湖现场概貌

点,设计标准高、难度大。沿地基深度方向,依次分布富盐盐渍土、深厚松软土与级配不良砂 3 种特殊岩土,如图 2 所示。工程地质条件极差,地震烈度高,地下水侵蚀性强。地基加固工程设计面临着富盐盐渍土的膨胀性、溶陷性、腐蚀性、砂土液化、深厚松软土稳定性及沉降控制等多重难题。

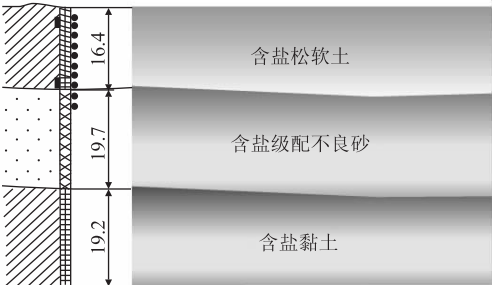


图2 Hoze Soltan 盐湖地层剖面(m)

1.2 设计控制指标

结合高速铁路设计要求,拟定 Hoze Soltan 盐湖软弱盐渍土地基加固的设计控制指标,如表 1 所示。

表1 Hoze Soltan 盐湖地基加固设计控制指标

项目	控制指标
地基变形	工后沉降 $\leq 5\text{ cm}$
	差异沉降 $\leq 3\text{ cm}$
路基稳定性(安全系数 K)	施工期(一般工况) $K\geq 1.15$
	运营期(一般工况) $K\geq 1.30$
	运营期(地震工况) $K\geq 1.15$
耐久性	100 年

2 地基加固关键技术

2.1 方案提出

根据 Hoze Soltan 盐湖的复杂工程地质条件,结合现有的设计理论、计算方法、控制标准及施工工艺等因素,以安全经济、高速铁路声誉、创新驱动及业主认可为目标,制定了如下 4 个设计方案:

(1) 桩网结构

鉴于伊朗境内缺乏粉煤灰和活性矿石粉,若采用常规的 CFG 桩,需进口粉煤灰,成本较高,并且通过调查当地的水泥厂,有美标的 V 号水泥,具有抗侵蚀性能。因此,桩网结构拟由 CG 桩(素混凝土桩)或预制桩、桩帽和加筋垫层组成,结构形式如图 3 所示,加筋垫层采用碎石垫层夹两侧土工格栅。

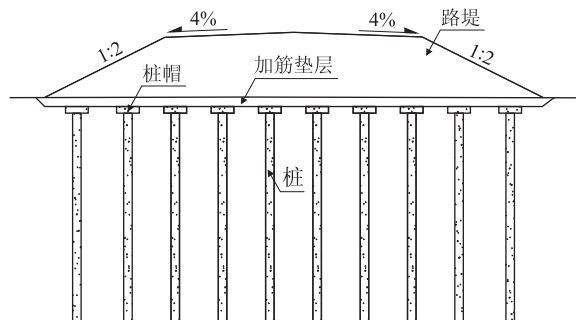


图3 桩网结构

(2) 桩筏结构

桩筏结构拟由 CG 桩或预制桩、钢筋混凝土板组成,结构形式如图 4 所示。

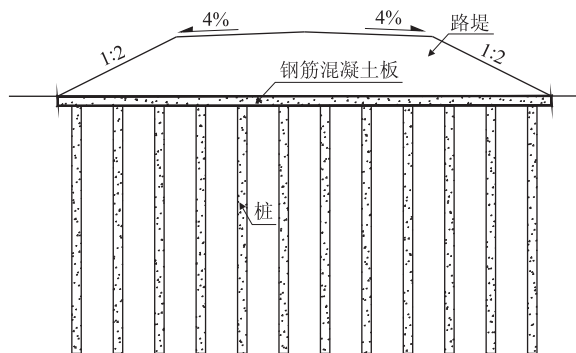


图4 桩筏结构

(3) 桩板结构

桩板结构由钻孔灌注桩和钢筋混凝土板组成,结构形式如图 5 所示。

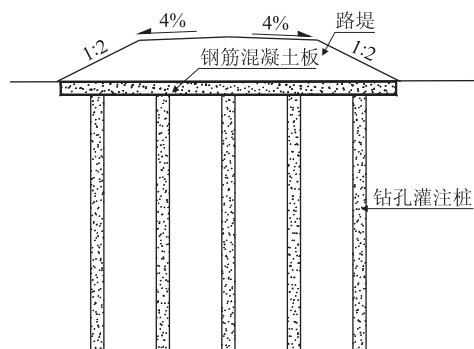


图5 桩板结构

(4) 碎石桩复合地基

复合地基由碎石桩和加筋垫层组成,结构形式如图 6 所示。

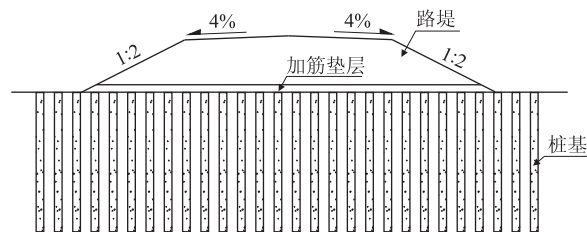


图6 复合地基

2.2 计算分析

2.2.1 计算方法

(1) 桩基承载力

碎石桩复合地基承载力按 TB 10106 - 2010《铁路工程地基处理技术规程》执行^[9],文中不再赘述。

刚性桩单桩竖向承载力按 JGJ 94 - 2008《建筑桩基技术规范》执行^[10],文中亦不赘述。

(2) 稳定性

路基稳定性分析应根据土工试验和原位测试成果^[11],并结合工程经验采用圆弧滑动法进行计算,目前国际上常用的圆弧滑动法包括瑞典条分法和 Bishop 法。

刚性桩基稳定性计算与天然地基类似,其中圆弧滑动面经过加固区时,采用桩土综合强度指标^[9],经过非加固区时,采用天然地基强度指标。

柔性桩复合地基稳定性计算也与天然地基类似,其中圆弧滑动面经过碎石桩复合地基加固区时,采用复合土体综合强度指标^[9],经过非加固区时,采用天然地基强度指标。

(3) 工后沉降

路基工后沉降指的是为路基竣工铺轨后产生的沉降,工后沉降量应按式(1)进行计算:

$$S_r = S_1 + S_2 - S_T \quad (1)$$

式中: S_r ——路基填土、轨道及列车荷载引起的工后沉降量;

S_1 ——由填土荷载引起的路基最终沉降量;

S_2 ——轨道及列车荷载引起的路基最终沉降量 mm;

S_T ——路基竣工铺轨完成已经发生的沉降量(称施工期沉降量)。

在最终沉降量计算方面,CG 桩与碎石桩可参照文献[9]执行,预制桩、钢筋混凝土钻孔灌注桩可参照文献[10]执行,文中不再赘述。

其中 S_T 可按式(2)计算

$$S_T = \eta S_1 \quad (2)$$

式中: η ——沉降完成比例系数^[9]。

2.2.2 结果分析

(1)CG 桩

断面 DK 84 + 620 属于典型的厚度较大的松软土地基,路基填高 3.2 m,基底拟采用 CG 桩进行加固,桩径 0.5 m,桩间距 1.8 m,正方形布置,CG 桩打穿表层松软土,桩长 12 m。土层剖面及计算参数如表 2 所示,结合表 2 及上述方法,开展承载力及工后沉降计算,结果如表 3 所示。由表 3 可知,采用 CG 桩加固后,单桩承载力及工后沉降均满足设计要求,说明 CG 桩加固厚度较大的松软土地基具有可行性。

(2)预制桩

以 DK 84 + 620 为算例,开展预制桩加固承载力及工后沉降计算。即路基基底采用 C50 钢筋混凝土预制方桩进行地基加固,方桩截面尺寸为 0.45 m × 0.45 m,桩间距 2.5 m,预制桩打穿松软土层,桩长 12 m。预制桩承载力及工后沉降计算结果如表 3 所示,由表 3 可知,采用预制桩加固后,单桩承载力及工后沉降均满足设计要求,说明预制桩加固松软土较厚的地基也是可行的。

(3)桩板结构

以 DK 84 + 620 为算例,开展路基桩板结构承载力

及工后沉降计算。桩板结构由 C45 钢筋混凝土板、C45 钢筋混凝土钻孔灌注桩基组成。钢筋混凝土板板宽 25.6 m,高 1 m,每三跨为一联。板长 20 m,板底设置直径为 1 m 的钻孔灌注桩,桩长 12 m,钻孔桩横向桩间距为 5 m,纵向桩间距为 5 m。桩板结构承载力及工后沉降计算结果如表 3 所示,由表 3 可知,采用桩板结构加固后,地基承载力及工后沉降均满足设计要求,说明路基桩板结构加固松软土较厚的地基也是可行的。

(4)碎石桩

以 DK 84 + 620 为算例,开展碎石桩复合地基承载力、稳定性及工后沉降计算。即路基基底采用碎石桩进行加固,桩径 0.5 m,桩间距 1.2 m,正方形布置,碎石桩打穿松软土层,桩长 12 m,加固区坡脚外扩大宽度不小于 3 m。碎石桩承载力及工后沉降计算结果如表 3 所示,同时进行了稳定性检算,其中施工期(一般工况) $K = 1.68 > 1.15$ 、运营期(一般工况) $K = 1.69 > 1.30$ 、运营期(地震工况) $K = 1.23 > 1.15$ 。从上述计算结果可知,采用碎石桩复合地基加固后,单桩承载力及稳定性均满足设计要求,但工后沉降不满足设计要求,可见,碎石桩复合地基不适于加固厚度较大的松软土地基。

表 2 断面 DK 84 + 620 土层剖面及计算参数

层号	土名	层厚 /m	容重 /(kN/m ³)	压缩模量/MPa				黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /°	端阻力 /kPa	侧摩阻力 /kPa
				$E_{s0.0-0.1}$	$E_{s0.1-0.2}$	$E_{s0.2-0.4}$	$E_{s0.4-0.6}$				
1	黏土①	10.4	16	2.1	3	7.5	10.8	15	17	3 100	29
2	中砂	4	20	30	34	40	45	10	26	4 500	59
3	黏土②	8	17	5.2	8	9	12	31	23	3 800	60
4	黏土③	—	18	2.1	3	7.5	10.8	19	22	3 300	29

表 3 断面 DK84 + 620 承载力及工后沉降计算结果

方案	桩顶竖向 荷载 N /kN	单桩竖向 承载力 R_a /kN	判断	工后沉降 S_r /mm	容许工后 沉降 $[S_r]$ /mm	判断
CG 桩	383	730	$N < R_a$	37.5	50	$S_r < [S_r]$
预制桩	738	886	$N < R_a$	37.8	50	$S_r < [S_r]$
桩板结构	2 033	2 342	$N < R_a$	30.6	50	$S_r < [S_r]$
碎石桩	170	216	$N < R_a$	54.1	50	$S_r > [S_r]$

2.3 优缺点分析

结合施工条件、工程投资、业主需求等,进一步分析桩网结构、桩筏结构、桩板结构及复合地基的优缺点(如表 4 所示)。由表 4 可知,桩筏结构与桩板结构的工程投资高难以获得业主认可;碎石桩复合地基工程投资最低,适用于处理场地内的液化砂土,但对深厚松软土的处理效果不佳,沉降不易控制;CG 桩或预制桩桩网结构施工快捷,适用于处理深厚松软土,也适用于处理液化砂土。

表 4 方案优缺点分析

方案	优点	缺点
桩网结构	①施工速度快、质量容易控制 ②结构受力最简单	①填方小于 3 m 的地段,土拱效应较难发挥 ②桩间盐渍土溶陷可能造成路基面不均匀沉降 ③段内侵蚀性环境为 H2、L3、Y3,桩体抗侵蚀要求高 ④有害盐容易富集在加紧垫层腐蚀土工格栅
桩筏结构	①桩间盐渍土溶陷对路基变形影响较小 ②施工便捷	①段内侵蚀性环境为 H2、L3、Y3,桩体抗侵蚀要求高 ②筏板养护难度较大 ③工程造价相对方案一较高
桩板结构	①结构受昼夜温差荷载影响小 ②桩间盐渍土溶陷对路基变形影响较小 ③需钻孔施工的总桩长最小	①钻孔存在塌孔风险,若出现塌陷需钢护筒下底 ②施工桩长较长 ③钢筋混凝土板为大体积混凝土,养护难度大 ④工程投资最高
复合地基	①工程投资低 ②碎石桩处理地震液化效果好,抗侵蚀性好	①桩身刚度小,处理沉降效果较差 ②成桩质量难以控制 ③水泥搅拌桩抗侵蚀性难以满足要求,需进行抗侵蚀性试验

因此,从安全可靠、经济适用及施工便捷等角度考虑,推荐CG桩或预制桩桩网结构作为Hoze Soltan盐湖软弱盐渍土地基的加固方案。

2.4 优化设计

2.4.1 排盐及抗盐胀

挖除路基基底盐壳层,挖除厚度不少于0.5 m,并于挖除盐壳后的基底设置排水排盐层。排水排盐层是由下至上依次铺设的中粗砂层、碎石层,中粗砂层厚度不少于0.1 m,碎石层厚度不少于0.4 m,排水排盐层由路基中心向两侧按2%坡度摊铺。排水结构设置在排水排盐层两侧,包括倾斜排水排盐孔和排水沟,倾斜排水排盐孔设置在排水排盐层与两侧排水沟交界处。桩网结构代表性设计断面,如图7所示,排水排盐层大样,如图8所示。

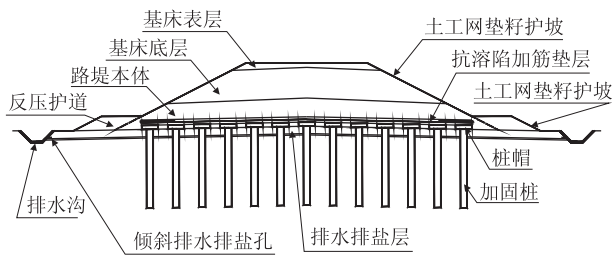


图7 桩网结构代表性设计断面

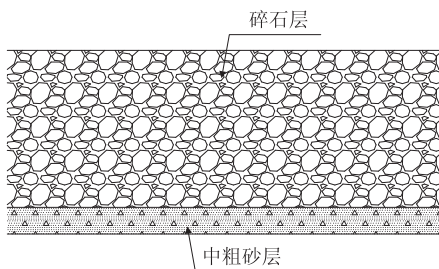


图8 排水排盐层大样图

排水排盐层设置在桩帽及抗溶陷加筋垫层下方,其作用在于将盐渍土地基中迁移至表层土的水盐及时排除至两侧排水沟;还可以降低地下水的毛细水上升高度,甚至消除毛细水上升,防止有害盐聚集在路堤底部产生次生盐害;排水排盐层也可作为变形缓冲层,消除或减弱盐渍土地基的盐胀变形。

2.4.2 抗溶陷

(1) 抗溶陷构造设计

由图7可知,CG桩或预制桩桩帽顶及碎石桩桩顶设置了抗溶陷加筋垫层,抗溶陷加筋垫层大样图如图9所示,其作用在于降低加固桩桩间盐渍土溶陷对路基面影响,确保路基长期服役功能。所述抗溶陷加筋垫层包括从下至上依次铺设的第一掺水泥碎石层、钢塑加筋复合土工格栅、第二掺水泥碎石层,其中第一掺水

泥碎石层和第二掺水泥碎石层的水泥掺入比为5%~7%,所用水泥应具有耐腐蚀性能。

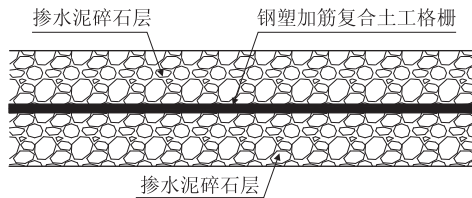


图9 抗溶陷加筋垫层构造

(2) 土工格栅设计值确定

结合文献[12]研究成果可知,抗溶陷加筋垫层的钢塑加筋复合土工格栅的抗拉力可按如下公式计算:

$$T_c = \left(\sqrt{\left(\frac{2s_{\max}}{r} \right)^2 + 1} - 1 \right) E_g \quad (3)$$

式中: T_c ——土工格栅抗拉力计算值;

r ——桩边缘至桩间土中心或形心的距离;

s_{\max} ——土工格栅最大容许变形量;

E_g ——格栅抗拉刚度。

其中, s_{\max} 应满足如下要求

$$s_{\max} \leq \min \left\{ \frac{r}{2} \sqrt{(1 + \varepsilon_{\max})^2 - 1}, [s_f] \right\} \quad (4)$$

式中: ε_{\max} ——设计期土工格栅最大容许应变,

$$\varepsilon_{\max} \leq 3\%;$$

$[s_f]$ ——高速铁路路基面允许沉降量。

土工格栅拉力设计还需考虑蠕变折减、材料稳定性、施工损伤及环境-酸碱-微生物等影响,即:

$$T_D \geq f_c f_m f_d f_e \left(\sqrt{\left(\frac{2s_{\max}}{r} \right)^2 + 1} - 1 \right) E_g \quad (5)$$

式中: T_D ——土工格栅抗拉力设计值;

f_c ——格栅蠕变折减系数,取3.6~4.0;

f_m ——材料生产稳定性可信系数,取1.05~1.10;

f_d ——施工损伤系数,取1.2~1.4;

f_e ——环境-酸碱-微生物影响系数,取1.8~2.0。

(3) 案例分析

以CG桩或预制桩桩网结构为算例,抗溶陷加筋垫层按上述构造组成设计,下面根据式(3)~式(5)确定土工格栅拉力设计值。

在计算过程中,格栅蠕变折减系数 f_c 取3.6,材料生产稳定性可信系数 f_m 取1.06,施工损伤系数 f_d 取1.2,环境-酸碱-微生物影响系数 f_e 取1.8,桩边缘至桩间土中心或形心的距离 r 取1.02 m,格栅抗拉刚度 E_g 取2 000 kN/m。

根据式(4),可知:

$s_{\max} \leq \min \{0.126 \text{ m}, 0.05 \text{ m}\} = 0.05 \text{ m}$,在计算过程中 s_{\max} 取0.05 m。

根据上述计算参数及式(5),可得

$$T_D \geq 79.0 (\text{kN/m})。$$

2.4.3 抗侵蚀

用于CG桩或预制桩及抗溶陷加筋垫层掺入的水泥应具有抗侵蚀性能的水泥,在伊朗境内可采用美标的V号水泥。在工程实施中,所用水泥应进行抗侵蚀性试验研究,并按设计要求在试验室内进行配合比试验,按配合比配制混合料,且配合比试验结果应满足抗侵蚀性要求。

3 结论

(1)Hoze Soltan 盐湖集富盐盐渍土、深厚松软土与级配不良砂等3种特殊岩土,且位于高烈度地震区,地下水侵蚀性强,工程地质条件极差;高速铁路罕见以长路基通过内陆大盐湖,其地基加固设计面临着盐渍土的盐胀性、溶陷性、腐蚀性、砂土液化及深厚松软土稳定性与沉降控制等多重难题。

(2)在桩网结构、桩筏结构、桩板结构及碎石桩复合地基计算分析的基础上,并结合施工条件、工程投资及业主需求的对比分析,推荐Hoze Soltan 盐湖地基的加固方案为CG桩或预制桩桩网结构。

(3)研发了具有排盐、抗溶陷、抗盐胀及抗侵蚀的桩网结构,即设计中以排水排盐层将迁移至表层土的水盐及时排除至两侧排水沟,也可作为变形缓冲层消除或减弱地基盐胀变形;以抗溶陷加筋垫层降低桩间盐渍土溶陷变形对路基的影响,确保路基长期服役功能;在伊朗境内以美标的V号水泥达到加固结构的抗侵蚀要求。

(4)提出了抗溶陷加筋垫层土工格栅拉力设计值的确定方法,可避免不同高度路堤盲目采用高强土工格栅,既保证工程安全,也可有效减少材料用量,节约工程投资。

参考文献:

- [1] 陈伟志, 李安洪, 李楚根, 等. 无砟轨道粗颗粒盐渍土路基设计方法[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 58-63.
CHEN Weizhi, LI Anhong, LI Chugen, et al. Design Methods of Coarse Grained Saline Soil Subgrade in Ballastless Track [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 58-63.
- [2] 曾永红, 陈伟志, 吴沛沛, 等. 高速铁路路基基底盐渍土抗溶陷措施[J]. 铁道建筑, 2017, 57(5): 100-103.
ZENG Yonghong, CHEN Weizhi, WU Peipei, et al. Resist Collapse Measures of Saline Soil under High Speed Railway Subgrade [J]. Railway Engineering, 2017, 57(5): 100-103.
- [3] Mikheev V V, Petrukhin V P. Construction Properties of Saline Soils used as Foundation Beds in Industrial and Civil Construction [J]. Soil Mechanics & Foundation Engineering, 1973, 10(1): 30-36.
- [4] Nambiar M R M, Venkatapparao G, Gulhati S. The Nature and Engineering Behavior of Fine-grained Carbonate Soil from off the West Coast of India [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 1985, 359(2): 17-20.
- [5] Moayed R Z, Izadi E, Heidari S. Stabilization of Saline Silty Sand Using Lime and Micro Silica[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(10): 3006-3011.
- [6] 黄晓波, 周立新, 何淑军, 等. 浸水预溶强夯法处理盐渍土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2080-2084.
HUANG Xiaobo, ZHOU Lixin, HE Shujun, et al. Study on Test of Saline Soil Ground Treatment with the Soaking and Dissolving Combined Dynamic Compaction Method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2080-2084.
- [7] 张彧, 房建宏, 刘建坤, 等. 强夯置换复合地基加固盐渍土效果的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 258-261.
ZHANG Yu, FANG Jianhong, LIU Jiankun, et al. Field Tests on Reinforcement Effects of Ground Treatment of Composite Foundation in Saline Soils by Dynamic Compaction Replacement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 258-261.
- [8] 岳浩淼, 黄建明, 文桃, 等. 换填覆重法处理砂类硫酸盐渍土地基的室内模拟试验[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 471-478.
YUE Haomiao, HUANG Jianming, WEN Tao, et al. Experimental Study of Foundation Treatment of Sulphate Saline Sandy Soil Using Heavy Cover Replacement Technique [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 471-478.
- [9] TB 10106-2010 铁路工程地基处理技术规程[S].
TB 10106-2010 Technical Code for Ground Treatment of Railway Engineering[S].
- [10] JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S].
JGJ 94-2008 Technical Code for Building Pile Foundations[S].
- [11] 周成. 深厚软土地基沉降特性离心模型试验研究[J]. 高速铁路技术, 2011, 2(1): 15-19.
ZHOU Cheng. Experimental Study on Centrifugal Model of Settlement Property on Deep Soft Soil Foundation [J]. High Speed Railway Technology, 2011, 2(1): 15-19.
- [12] 蒋关鲁, 徐鹏. 桩网结构支承路堤土工格栅拉力计算方法探讨[C]//第五届全国土工合成材料加筋土学术研讨会论文集. 成都:西南交通大学出版社, 2015: 61-67.
JIANG Guanlu, XU Peng. Discussion on the Calculation Method of Pile Net Supported Embankment Geogrid Tension [C] // The Fifth National Symposium on Geosynthetics Reinforced Soil Symposium. Chengdu: Southwest Jiaotong University press, 2015: 61-67.

(编辑:车晓娟 白雪)