

强夯置换复合地基加固盐渍土效果的试验研究

张 彧^{1,2}, 房建宏³, 刘建坤¹, 徐安花³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 兰州交通大学交通运输学院, 甘肃 兰州 730070;
3. 青海省交通科学研究所, 青海 西宁 810001)

摘要: 青海省察尔汗-格尔木高速公路地处青藏高原寒区和盐湖区, 地基土力学性质受土体含水率和气候条件变化等因素影响较大, 给工程建设带来一定困难。通过对该盐渍土试验段进行强夯置换复合地基处理后的原位测试, 给出强夯置换复合地基承载力和变形模量确定方法, 并对加固后复合地基的强度和变形模量的计算结果给予了分析, 承载力满足要求。同时对强夯置换复合地基的桩土工作机理以及沉降折减等问题给出了评价, 强夯置换方案有利于盐渍土地基中水分和盐分的迁移及减少地基沉降, 具有良好的加固效果。

关键词: 盐渍土; 强夯置换砾石桩; 复合地基; 原位测试

中图分类号: TU472.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S1-0251-04

作者简介: 张 彧(1981-), 男, 山东莱州市人, 博士研究生, 讲师, 主要从事路基与岩土力学研究与教学工作。E-mail: zhangyu@mail.lzjtu.cn.

Field tests on reinforcement effects of ground treatment of composite foundation in saline soils by dynamic compaction replacement

ZHANG Yu^{1, 2}, FANG Jian-hong³, LIU Jian-kun¹, XU An-hua³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Qinghai Research Institute of Transportation, Xining 810001, China)

Abstract: The Qarhan-Golmud Highway of Qinghai Province is located in cold region of Qinghai-Tibet Plateau and salt lake region. The mechanical properties of saline soils vary with moisture and climate, which will influence the project construction. The gravel piles formed by the dynamic compaction replacement are applied in composite foundation of saline soils, and field tests are carried out in this region. It provides methods for determining the coefficients of the capacity and deformation modulus of composite foundation with the gravel piles formed by the dynamic compaction replacement. The calculated values are analyzed, and they meet the met design requirements. At the same time, the strength and working mechanism of pile-soil and settlement reduction of the composite foundation are analyzed after reinforcement. The reinforcement case of dynamic compaction replacement has good reinforcement effects in saline soils of salt lake region, which helps the migration of water and salt and reduces foundation settlement in saline soils.

Key words: saline soils; dynamic compaction replacement; composite foundation; field test

0 引 言

在公路工程中盐渍土一般指地表下 1.0 m 深的土层内易溶盐平均含量大于 0.3% 的土。盐渍土对公路的影响, 主要取决于盐渍土所含易溶盐类的成分、性质和盐的总含量、盐类与水状态的关系, 以及所在地区自然条件对盐渍土稳定性的影响。

随着中国广大西北地区的开发和建设, 对盐渍土地基工程提出了更高的要求。由于盐渍土与一般土不同, 甚至比冻土、膨胀土和湿陷性黄土更特殊更复杂。

它除了具有溶陷性外, 还具有盐胀性和腐蚀性, 给工程带来许多危害, 造成了巨大的经济损失。加固方法也根据含盐情况、地下水含量、气象等条件选择不同的地基处理方法。之前关于砾石桩在盐湖重盐渍土区的施工尚无成功经验, 强夯置换施工在盐湖重盐渍土区也属首次, 所以在这种环境下, 采用砾石桩与强夯置换处理方法对其进行加固处理, 并通过现场试验分

基金项目: 青海省交通建设科技项目(2009-02)

收稿日期: 2011-04-13

析和评价加固效果,对今后在类似环境下进行此类施工有较强的指导意义。

1 工程概况

青海省察尔汗至格尔木高速公路地处察尔汗盐湖重盐渍土地区和青藏高原寒区,该区域内太阳辐射量大、日照时间长、昼夜温度变化剧烈,地表下有地下水分布。在干旱气候条件下,干燥和稍湿状态的盐渍土具有一定的溶陷性,在土的自重压力或地表附加压力作用下受水浸湿产生溶陷变形,强度降低^[1]。该公路所处地层土质为低液限黏土,呈软塑状态,成分以黏粒为主,次为粉粒,局部夹盐晶薄层,定名为氯盐型过盐渍土~强盐渍土;厚度一般2.0~10.0 m不等;地基承载力基本容许值(σ)=130~200 kPa;盐渍土中的盐晶具有强腐蚀性和强溶陷性,工程地质性质较差,不宜做天然地基。所以采用强夯置换处理方法对其进行加固处理,以期满足设计要求。

表1中给出了这两种加固方法主要设计参数。

表1 加固方法主要设计参数

Table 1 Main design parameters for reinforcement

加固方法	主要设计参数
砾石桩	采用振动沉桩,桩长5.0 m,桩端支承于下部致密黏土层上;平均桩径500 mm,桩间距为1.5 m(面积置换率 m 约10%);单桩承载力设计值大于300 kPa;单桩复合地基承载力设计值大于150 kPa
强夯置换	置换墩直径2.3 m,墩间距为5 m,置换墩深约2 m左右(面积置换率 m 约19.2%),夯击能为3000 kN,单墩承载力设计值大于300 kPa;强夯置换复合地基承载力设计值大于150 kPa

2 现场测试

强夯置换平板载荷试验之前,先进行砾石桩复合地基平板载荷试验,分别对砾石桩单桩,单桩复合地基及桩间土进行;之后对强夯置换复合地基分别进行墩体和墩间土平板载荷试验各2组进行平行试验。开始试验时间、试验过程中加卸荷及测读程序的标准,成果曲线及荷载的判定均以《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001)为参照标准。

载荷试验承载板采用刚性圆形承载板。单桩复合地基载荷试验承载板尺寸由面积置换率计算确定^[3-4];强夯置换墩和墩间土载荷试验承载板面积0.785 m²。

承载力可通过载荷试验加载至破坏荷载,以破坏荷载的前一级荷载作为极限荷载,然后除以安全系数得到容许承载力;也可绘制 $P-S$ 曲线,当曲线上有明显的拐点时,定出 p_0 ,作为地基承载力。但由于试

验曲线大多拐点不明显,故采用相对沉降法,桩(墩)间土及复合地基承载力值通过取相对变形量($S/D=0.015$)时确定,砾石桩单桩及强夯置换墩承载力值通过取相对变形量($S/D=0.04$)时确定。强夯置换载荷试验计算数据见表2。

表2 载荷试验数据汇总表

Table 2 Data of loading tests

试验类别	试验组数	压板面积/m ²	最终沉降/mm	最终荷载/kPa	按相对变形确定		变形模量/MPa
					允许沉降/mm	承载力/kPa	
置换墩	2	0.785	41.05	600	40	539.21	23.38
墩间土	2	0.785	44.30	600	15	262.63	11.39

3 复合地基试验数据分析

3.1 砾石桩复合地基承载力分析

针对此次振动沉桩的施工工艺,通过之前几组试验值,确定复合地基承载力修正系数,对以后的复合地基承载力计算可以通过单桩和桩间土承载力来确定。

按照桩体和桩间土共同承担上部荷载的原理,砾石桩复合地基承载力可用下式估算^[4]:

$$R_{cf} = R_1 \lambda_1 m R_{pf} + R_2 \lambda_2 (1-m) R_{sf} \quad (1)$$

式中 R_{cf} 、 R_{pf} 、 R_{sf} 分别为复合地基、桩(墩)体以及桩(墩)间土的复合地基承载力标准值; λ_1 、 λ_2 分别为反映桩(墩)体、桩(墩)间土实际承载力的修正系数,与地基土质情况等因素有关。由此也可看出复合地基受力表现为桩与桩间土共同承担荷载^[5-7]。计算时,取 $R_1 \lambda_1$ 、 $R_2 \lambda_2$ 为1.5,代入单桩承载力以及桩间土承载力试验值,得到单桩复合地基承载力计算值与相应试验值比较接近(误差仅为4.6%),说明上述计算中系数的选用合理。

3.2 强夯置换复合地基承载力分析

置换墩、墩间土现场载荷试验曲线如图1。针对此次强夯置换复合地基载荷试验,其单墩承载力为539.21 kPa,墩间土承载力为262.63 kPa。从图1可以看出,强夯置换法中置换墩与墩间土同等荷载对应的位移差较小,说明由强夯置换法加固处理过的盐渍土地基,墩土能较好的发挥承载及抵抗变形的能力。本次现场试验没有对强夯置换复合地基进行平板载荷试验,原因在于进行试验困难较大,根据置换率计算,强夯置换单墩复合地基平板载荷试验需要载面板面积达到21.63 m²,加载重量超过千吨,有很大的试验难

度, 但可以通过以求得的置换墩和墩间土承载力及上面单桩复合地基承载力修正系数确定出强夯置换复合地基承载力, 将置换墩和墩间土承载力以及置换率和承载力修正系数 $R_1 \lambda_1$, $R_2 \lambda_2$ 代入式 (1), 得到强夯置换复合地基承载力为 476.56 kPa。

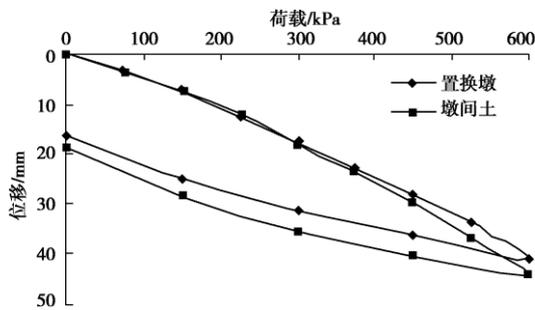


图 1 置换墩、墩间土载荷试验曲线

Fig. 1 Curves of loading tests on single replacement pier and soil between piers

3.3 桩(墩)土应力比 η 及荷载分担比 δ

应力比是指承载板下桩(墩)上的应力同桩(墩)间土之比, 反应复合地基桩(墩)土共同承担荷载的重要指标。影响应力比的因素主要有桩(墩)土应力应变关系, 施工质量以及被加固地基的土质、桩(墩)径及碎石级配等。可按式计算^[8-9]:

$$\eta = R_{pf} / R_{sf} = E_p / E_s \quad (2)$$

式中 E_p , E_s 分别为桩(墩)体和桩(墩)间土变形模量。根据表 2 中的数据计算求得强夯置换复合地基墩土应力比 η 为 2.05。

桩(墩)土荷载分担比是指在复合地基中桩(墩)承担的荷载与复合地基承担的荷载的比值, 可按式计算:

$$\delta = \frac{R_{pf} A_p}{R_{pf} A_p + R_{sf} A_s} \quad (3)$$

将式 (2) 代入式 (3), 则有

$$\delta = \frac{m\eta}{m(\eta-1)+1} \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 桩(墩)土荷载分担比 δ 只与桩(墩)土应力比 η 和置换率 m 有关, 在 m 一定的情况下, δ 值随 η 值的增加而增加; 在 η 值一定的情况下 δ 值随 m 值的增加而增加。强夯置换复合地基墩土荷载分担比 δ 为 32.8%。因此, 强夯置换复合地基所承担的大部分荷载均由桩(墩)间土承担, 这也说明桩(墩)间土由于挤密效应是复合地基承载力提高的主要原因, 桩(墩)上应力集中是复合地基承载力提高的次要原因。与之前计算的砾石桩复合地基相比较, 砾石桩在复合地基中分担的比重要低于置换墩, 这取决于应力比 η 和置换率 m 的大小。

3.4 强夯置换复合地基变形模量分析

复合地基变形计算主要是计算变形模量 E 值。根据载荷试验成果, 按下式进行计算:

$$E = \omega(1-\mu^2) \frac{p_0 D}{s} \quad (5)$$

式中 p_0 为承压板上直线变形阶段的荷载, (kPa); S 为与荷载 P_0 对应的承压板沉降, (mm); μ 为复合地基的泊松比, 砂土取 0.3, 粉土取 0.35, 黏土为 0.42, 淤泥质土为 0.5, 碎石为 0.1~0.2, 当砾石桩体占 1/10~1/5(即面积置换率)时, 复合地基的泊松比为 0.3~0.4; D 为承载板边长或直径, (mm); ω 为压板形状系数, 方形压板取 0.88, 圆形压板取 0.79。

置换墩间土可按式 (5) 计算, 得出变形模量为 11.39 MPa。

另外, 复合地基变形模量也可由桩(墩)体与桩(墩)间土变形模量按下式确定:

$$E_{CS} = R_1 \lambda_1 m E_p + R_2 \lambda_2 (1-m) E_s \quad (6)$$

$R_1 \lambda_1$, $R_2 \lambda_2$ 取值与前相同, 将其代入公式 (6) 可得

$$E_{CS} = R \lambda [1+m(\eta-1)] E_s \quad (7)$$

将强夯置换法加固处理的置换率 m 和墩土应力比 η 代入式 (7) 计算, 可得强夯置换复合地基变形模量为 20.53 MPa。

由于地基地处盐湖区, 地表下有地下水分布, 强夯置换法也形成了利于排水的砾石桩(墩), 且强夯置换给地基提供的夯击能是砾石桩复合地基无法比拟的, 而且其置换率也大于砾石桩复合地基, 因此强夯置换法加固后的承载力和变形模量也较大。

3.5 强夯置换复合地基沉降折减系数分析

沉降折减系数是指天然黏性土地基经过处理后的沉降量与天然地基原始沉降量的比值, 反映天然黏性土地基经加固后的减少沉降效果, 可按式计算:

$$\beta = \frac{1}{1+m(\eta-1)} \quad (8)$$

经计算得出强夯置换复合地基沉降折减系数为 0.83。即天然盐渍土地基经强夯置换加固后可以减少沉降 17%。沉降折减系数仅与置换率和桩(墩)土应力比有关, 这两者的协调将决定沉降折减系数的大小。只要施工质量有保证, 经加固后的地基沉降量均有所减小^[10]。

4 结 论

此次强夯置换在盐湖重盐渍土区的施工属首次应用, 通过现场原位测试分析和比较, 对加固效果进行评价, 对今后在类似环境下进行此类设计和施工有较强的指导意义。

(1) 在高温干旱环境下, 表层盐渍土极易固结。土体很容易形成所谓的“硬壳层”, 强度较高, 但极不稳定, 所以在地基处理中首先应将表层覆盖的盐壳清除。

(2) 强夯置换复合地基能在含有地下水的盐渍土中形成良好的排水和排盐通道, 有效降低土体中的地下水水位, 提高土体强度, 促使盐分向上迁移, 减少盐胀影响, 具有良好的加固效果。由于夯击能的作用强夯置换复合地基承载力和变形模量都较砾石桩复合地基大。

(3) 强夯置换砾石桩(墩)属于柔性桩(墩), 桩(墩)土共同承受上部荷载。强夯置换复合地基墩土应力比约为 2.05。

(4) 应用砾石桩复合地基承载力和弹性模量公式确定系数后, 可以确定出强夯置换复合地基的承载力和弹性模量。砾石桩和强夯置换均可有效降低盐渍土天然地基的沉降。

参考文献:

- [1] 刘建坤, 曾巧玲, 侯永峰. 路基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (LIU Jian-kun, ZENG Qiao-ling, HOU Yong-feng. Subgrade Engineering[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [2] GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB50021—2001 Code for Geotechnical Engineering Investigation[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002. (in Chinese))
- [3] 龚晓楠. 地基处理手册[M]. 第 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (GONG Xiao-nan. Foundation treatment manual[M]. 3rd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2008. (in Chinese))
- [4] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (Editorial Committee of the Foundation treatment manual. Foundation treatment manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2000. (in Chinese))
- [5] 郑俊杰, 彭小荣. 桩土共同作用设计理论研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 242 - 245. (ZHENG Jun-jie, PENG Xiao-rong. Study on design theory of pile—soil cooperative work[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 242 - 245. (in Chinese))
- [6] 闫澍旺, 崔 激. 复杂条件下山区高路堤弹塑性固结问题的有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 474 - 479. (YAN Shu-wang, CUI Wei. FEA of elastic-plastic consolidation of high embankment in mountainous area under complex conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 474 - 479. (in Chinese))
- [7] 李国维, 杨 涛. 柔性基础下复合地基桩土应力比现场试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 265 - 269. (LI Guo-wei, YANG Tao. Field experimental study on pile-soil stress ratio of composite ground under flexible foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 265 - 269. (in Chinese))
- [8] 张艳美, 张鸿儒, 张旭东. 碎石桩复合地基的研究进展与分析[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 100 - 106. (ZHANG Yan-mei, ZHANG Hong-ru, ZHANG Xu-dong. Advance in researches of the stone column composite foundation and its analysis. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(1): 100 - 106. (in Chinese))
- [9] 刘 杰, 张可能. 碎石桩复合地基若干问题的理论分析[J]. 力学与实践, 2003, 25(5): 44 - 47. (LIU Jie, ZHANG Ke-neng. Theoretical analysis of some problems about the composite foundation of gravel piles[J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25(5): 44 - 47. (in Chinese))
- [10] 牛志荣. 地基处理技术及工程应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004 (NIU Zhirong. Foundation treatment technology and engineering application[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2005. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)