

削山填谷区域变刚度复合地基处理技术

刘佑祥, 王发玲, 刘忠富, 郭运, 龙晓东, 陈凯

(中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要:经削山填谷后的山区新填土区域, 填土厚度变化大。若不进行合理的地基处理, 其上方的建(构)筑物极易产生不均匀沉降, 影响其使用。以十堰基地迁建项目为依托, 对采用不同能级强夯+注浆+DJP桩加固新填土地基的变刚度复合地基处理技术在削山填谷区域的应用进行了研究, 并结合动力触探测试、单桩静载试验和平板载荷试验等试验数据对地基处理效果进行了分析。结果表明, 该方案可以有效降低地基整体沉降和差异沉降, 是一种行之有效的组合、新工艺。本研究为山区建设中削山填谷区域地基处理提供了新的思路和经验。

关键词:变刚度; 复合地基; 强夯; 注浆; DJP桩

中图分类号:P 632 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2021)01-0069-07

0 引言

削山填谷的山区新填土区域, 由于山地的起伏变化, 导致填土厚度变化大, 且大部分填土为削山碎石土, 粒径变化大, 回填方式多为随意抛填, 未进行分层碾压夯实。此类回填土一是回填时间短, 未能完成自重作用下的固结沉降; 二是密实度差异大, 均匀性差。若不进行合理的地基处理, 极易导致地基上方的建(构)筑物产生大的整体沉降和差异沉降。根据这类回填土地基的特性, 可采用变刚度^[1]复合地基进行加固处理。

大量的试验和工程实例研究表明, 采用变刚度复合地基处理方法, 既能满足荷载与抗力的整体平衡, 又能兼顾荷载与抗力的局部平衡, 减小差异变形。陈龙珠等^[2]根据基底反力的分布特征, 利用有限元对变刚度复合地基进行分析, 提出地基变刚度调平处理的优化设计原则。乔京生等^[3]通过模型和模拟试验研究了群桩复合地基产生差异沉降的原因, 认为改变桩长是实现变刚度的最佳选择。李卫民等^[4]针对新填土地基提出采用低能级强夯+CFG桩的地基加固处理方案。张武等^[5]通过模型试验方法研究了变刚度复合地基的承载特征、沉降分布、变形影响范围、桩土荷载分担比及基桩荷载传递特性。吴旭君等^[6]针对新建城区大面积填土地基提出采用CFG桩加固处理的方案。江立群^[7]针对山区新填土地基提出采用强夯联合注浆的加固处理方案。李继才等^[8]根据大型储罐CFG桩复合地基的应力分布特征, 提出大型储罐复合地基空间变刚度调平设计方法。安明^[9]对超大粒径块石抛填地基采用强夯法进行加固处理。

本文以十堰基地迁建项目为依托, 对削山填谷区域的地基处理方法进行了深入的研究, 提出采用不同能级强夯+注浆+潜孔冲击高压旋喷桩(以下简称DJP桩)的变刚度复合地基处理方案, 以达到提高地基承载力、减小整体沉降和差异沉降的目的, 为山区建设中削山填谷区域地基处理提供了新的思路和经验。

1 变刚度复合地基处理设计方法

十堰基地迁建项目原始地貌为丘陵沟谷相间分布, 经开山填谷造地, 逐步整平形成。该项目规划用地总面积 1.497 km², 总投资 210 807 万元。场区典型地质剖面图如图 1 所示。填土主要为开山片岩块

收稿日期: 2020-01-22 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20200008

作者简介: 刘佑祥(1965—), 男, 正高级工程师, 研究方向为岩土工程勘察、设计施工等。E-mail: 768826134@qq.com

刘佑祥, 王发玲, 刘忠富, 等. 削山填谷区域变刚度复合地基处理技术[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(1): 69-75.

Copyright © 2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

石、碎石, 粒径变化大, 最大填土厚度约 50 m, 回填方式多为随意抛填, 未进行分层碾压夯实。

根据地质条件和上部建(构)筑物的使用要求, 设计应在保证地基承载力满足要求的前提下, 以变形控制为主要设计目标。为此提出采用不同能级强夯+注浆+DJP 桩的变刚度复合地基设计理念。通过强夯在上部形成硬壳层, 解决表层土体的结构架空问题; 对强夯影响深度范围以下的土体, 采用注浆法, 增强土颗粒间的联结, 提高土体强度; 对于变形要求严格的区域, 需同时设置 DJP 桩来减小沉降变形。

具体设计方法如下:

- (1) 由于填土松散, 填土厚度差异大, 且处理后要求达到的技术指标不同, 因此采用不同能级的强夯进行加固处理^[10-11], 不同强夯能级选取的原则: 填土厚度大的强夯能级高, 填土厚度小的强夯能级低。
- (2) 根据研究^[12], 12 000 kN·m 能级的强夯对碎石土的有效加固深度约为 11.0 m, 影响加固深度约 15 m。因此, 对强夯影响深度以下的土层, 即对埋深超过 15 m 的填土, 进行注浆加固, 以减小填土的颗粒孔隙, 提高土体密实度。
- (3) 对变形比较敏感的建(构)筑物区域, 根据填土深度设置不同桩数、直径和桩长的 DJP 桩进行加固处理, 以达到控制整体沉降和不均匀沉降的目的。

以总装车间为例, 采用变刚度地基处理的示意图如图 2~图 4 所示。

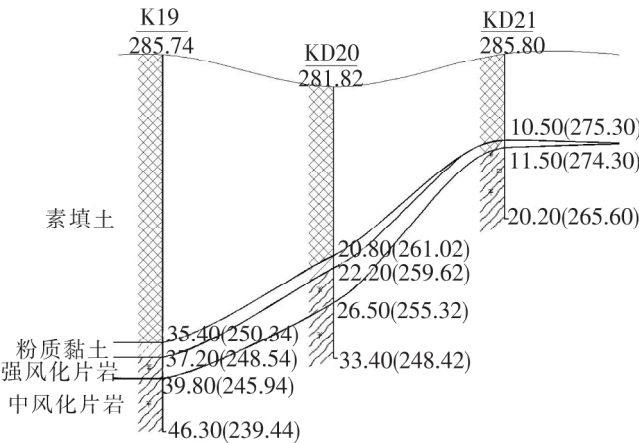


图 1 场区典型地质剖面

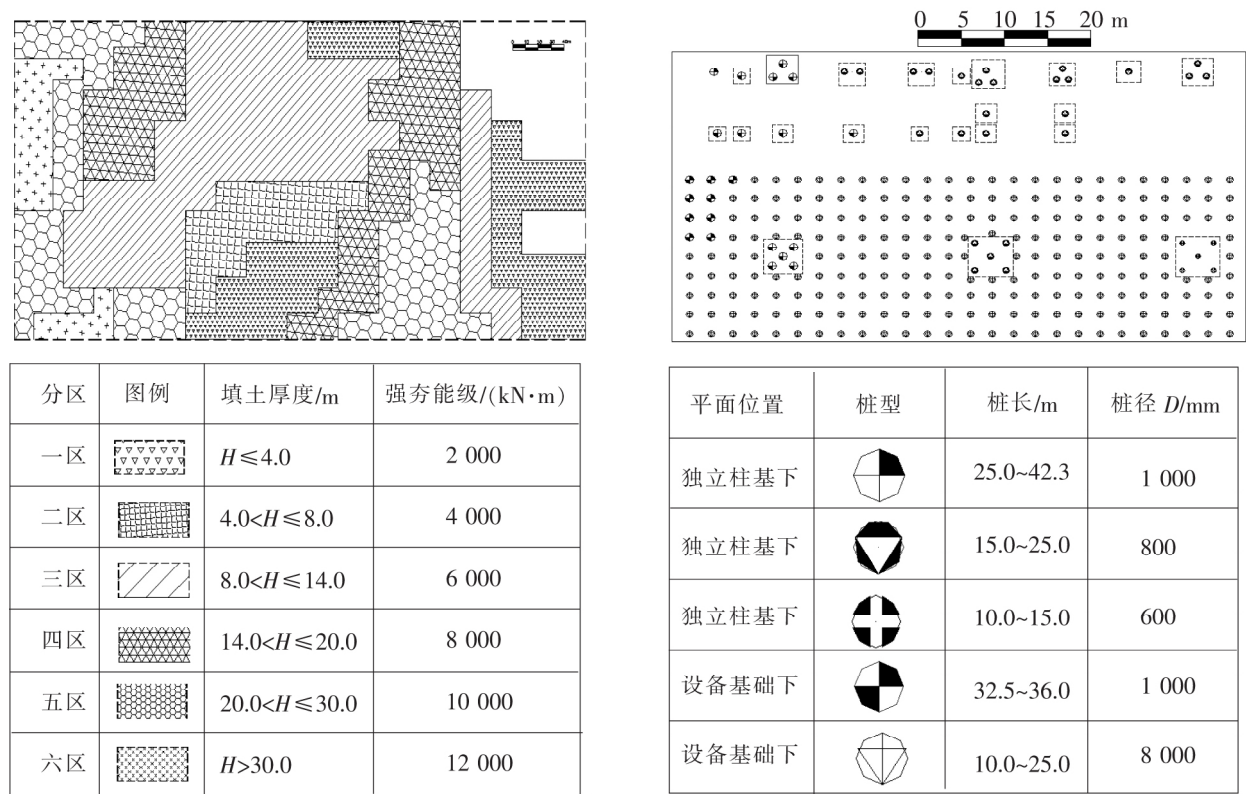


图 2 总装车间分级强夯平面布置图

图 3 部分总装车间 DJP 桩平面布置图

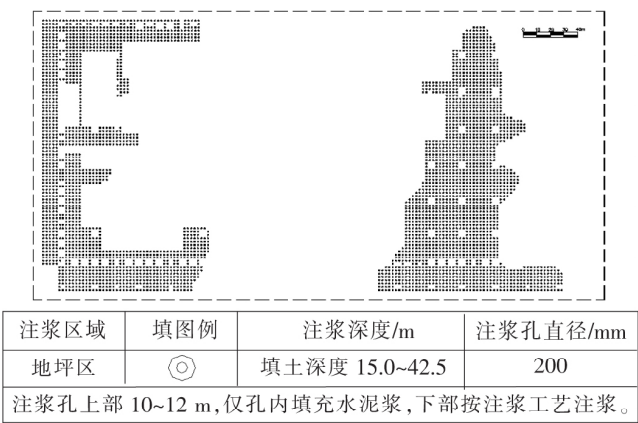


图 4 总装车间注浆平面布置图

2 不同能级强夯处理

2.1 不同能级强夯的设计

根据填土厚度不同, 分别选取 2 000、4 000、6 000、8 000、10 000、12 000 kN · m 能级进行强夯。4 000、6 000 kN · m 能级为第一类夯点, 采用 4 遍成夯, 第 1、2 遍为主夯, 第 3、4 遍为满夯; 8 000、10 000、12 000 kN · m 能级为第二类夯点, 采用 5 遍成夯, 第 1、2 遍为主夯, 第 3 遍为加密夯, 第 4、5 遍为满夯。强夯施工参数详见表 1。

表 1 强夯能级分区设计参数表

填土厚度 H/m	强夯能级/ $(\text{kN} \cdot \text{m})$	锤重/ t	落距/ m
$H \leq 4.0$	2 000	20	10
$4.0 < H \leq 8.0$	4 000	25	16
$8.0 < H \leq 14.0$	6 000	30	20
$14.0 < H \leq 20.0$	8 000	52	15.5
$20.0 < H \leq 30.0$	10 000	55	18.5
$H > 30.0$	12 000	70	17.5

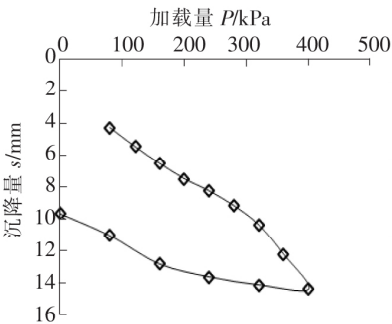


图 5 10 000 kN · m 能级平板载荷试验曲线图

2.2 强夯检测及效果评价

(1) 在施工完成后 7~14 d 内采用平板载荷试验进行地基承载力检测。试验加载过程中承压板四周未出现侧向挤出现象, 未出现沉降骤然增大现象, 加载至 400 kPa 后卸载, 直至试验结束。其中以 10 000 kN · m 能级为例, 其 P - s 曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 强夯后的地基承载力大于 200 kPa, 满足设计要求。建筑物外道路、停车场及绿化场地(处理后地基承载力特征值 f_{ak} 不小于 120 kPa)等对承载力要求小并对差异沉降不敏感的区域可以直接采用强夯后的人工地基。

(2) 强夯地基均匀性采用动力触探进行检验。取夯前 1 个测试孔、夯后各能级 1 个测试孔(在施工完成后 7~14 d 内测试)进行对比分析。以 10 000 kN · m 能级为例, 强夯前后超重型动力触探对比曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出, 夯后土体动探击数(修正击数)平均整体有所提高, 土体均匀性有所改善, 基本可达到中密状态。

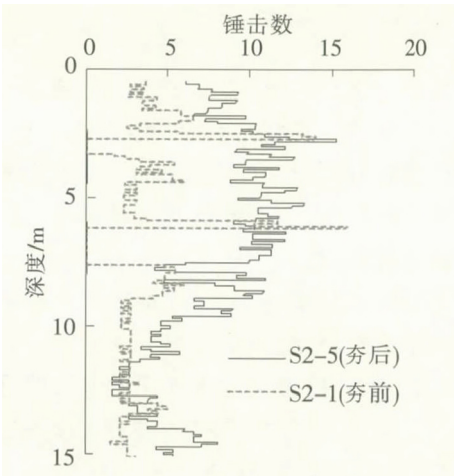


图 6 10 000 kN · m 能级动力触探测试对比图

3 注浆处理

3.1 注浆加固设计

注浆加固是将水泥浆或其他化学浆液注入地基土层中,以此增强土颗粒间的联结,提高土体强度,减小变形,降低土体的渗透性^[13-15]。对埋深超过 15 m 的填土,强夯完成后进行注浆加固,注浆孔按穿透填土厚度不小于 0.5 m 控制,注浆孔间距 2.5 m,按矩形布置。注浆压力、水泥掺量等施工参数根据注浆试验确定。

3.2 注浆检测及效果评价

注浆效果采用动力触探进行检验^[16]。取注浆前 1 个测试孔、不同强夯能级下注浆后 1 个测试孔(施工完成 28 d 后测试)进行对比分析。以 10 000 kN·m 能级强夯后的注浆孔为例,超重型动力触探对比曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,注浆后土体动探击数(修正击数)平均整体有所提高,土体密实度提高。

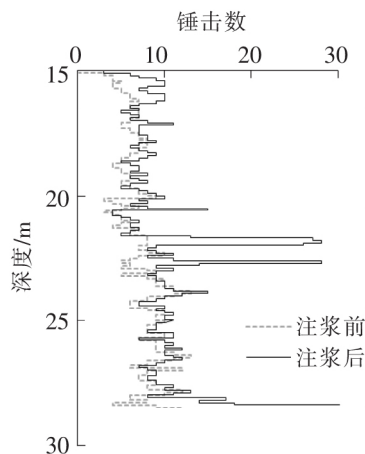


图 7 注浆前后动力触探测试对比图

4 DJP 桩复合地基

4.1 DJP 桩设计

潜孔冲击高压旋喷桩(DJP),是一种将潜孔锤与高压旋喷桩相结合的新型工法^[17]。根据《建筑地基基础设计规范》,单桩竖向承载力特征值可通过现场单桩荷载试验确定,也可按式(1)、式(2)估算,取其中较小值。

$$R_a = \eta f_{cu} A_p \quad (1)$$

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + \alpha_p q_p A_p \quad (2)$$

式中, f_{cu} 为与旋喷桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块(边长为 70.7 mm 的立方体)在标准养护条件下 28 d 龄期的立方体抗压强度平均值; η 为桩身强度折减系数,可取 0.33; A_p 为桩的截面积; u_p 为桩的周长; n 为桩长范围内所划分的土层数; l_i 为桩长范围内第 i 层土的厚度; q_{si} 为桩周第 i 层土的侧阻力特征值,可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007)有关规定或地区经验确定; α_p 为桩端阻力发挥系数,按地区经验确定; q_p 为桩端地基土未经修正的承载力特征值,可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007)的有关规定确定。

以总装车间为例,取桩径 0.6 m,桩长 12 m 的 DJP 桩估算单桩承载力, $R_a=140$ kN。

根据《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79—2012)对有粘结强度增强体复合地基承载力计算

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (3)$$

式中, f_{spk} 为复合地基承载力特征值; m 为面积置换率; R_a 为单桩承载力特征值; A_p 为桩的截面积; β 为桩间土承载力折减系数,可根据试验或类似土质条件工程经验确定,无经验时可取 0~0.5,承载力较低时取低值; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值,应按静载荷试验确定,无试验资料时可取天然地基承载力特征值。

以总装车间为例,取桩径 0.8 m、桩长 17 m、梅花形布桩的复合地基承载力 $f_{spk}=220$ kPa。

4.2 DJP 桩复合地基加固效果及评价

(1)单桩竖向承载力在成桩 28 d 后通过单桩静载试验进行检验。以总装车间桩径 0.6 m、桩长 12 m 的 DJP 桩为例,单桩静载试验结果如图 8 所示。从图 8 可以看出, Q_s 曲线呈缓变型,单桩竖

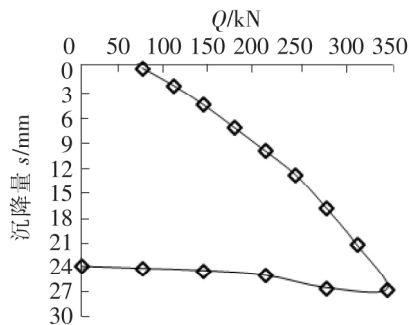


图 8 单桩静载试验曲线图

向承载力 $R_a > 140 \text{ kN}$, 满足设计要求。

(2) 复合地基承载力在成桩 28 d 后通过平板载荷试验进行检验。同样以总装车间桩径 0.6 m、桩长 12 m 的 DJP 桩处的复合地基为例, 平板载荷试验结果如图 9 所示。从图 9 可以看出, $P-s$ 曲线呈缓变型, 取 $s/b=0.006$ 对应的荷载为复合地基承载力, $f_{spk} > 220 \text{ kPa}$, 满足设计要求。

5 复合地基变形

5.1 变形计算理论

根据《建筑地基基础设计规范》和《建筑地基处理技术规范》计算复合地基压缩模量

$$E_{spi} = \xi E_{si} \tag{4}$$

$$\xi = f_{spk} / f_{ak} \tag{5}$$

式中, E_{spi} 为第 i 层复合土层的压缩模量; ξ 为复合土层的压缩模量提高系数; f_{spk} 为复合地基承载力特征值; f_{ak} 为基础底面下天然地基承载力特征值。强夯、DJP 工法桩、注浆加固处理部分处理区域沉降变形, 采用复合地基最终变形量进行估算

$$S = \phi_{sp} S' \tag{6}$$

式中, S 为复合地基最终变形量; ϕ_{sp} 为复合地基沉降计算经验系数, 根据地区沉降观测资料经验确定, 无地区经验时可根据变形设计深度范围内压缩模量的当量值 ($\bar{E}_s$) 取值; S' 为复合地基计算变形量, 加固土层的压缩模量可取复合土层的压缩模量, 地基变形计算深度应大于加固土层的厚度。

5.2 变形计算结果

根据不同填土厚度、不同荷载对地基沉降的影响, 选取有代表性的区域总装车间进行地基的整体沉降计算, 其加固设计方案如图 2~图 4 所示, 计算结果详见表 2。

表 2 总装车间基础 DJP 工法处理区地基最终变形量估算

桩数	桩径/m	桩长/m	估算总沉降量 s/mm
1	1.0	25.0~42.3	10.14~10.53
	0.8	15.0~25.0	10.75~10.86
	0.6	10.0~15.0	9.81~11.32
3	1.0	25.0~42.3	7.74~8.83
	0.8	15.0~25.0	8.05~9.14
	0.6	10.0~15.0	7.24~9.39
4	1.0	25.0~42.3	11.73~15.59
	0.6	10.0~15.0	13.38~15.59
5	1.0	25.0~42.3	10.80~12.95
	0.8	15.0~25.0	10.76~13.38
	0.6	10.0~15.0	8.16~11.09
6	0.8	15.0~25.0	11.75~12.59
	0.6	10.0~15.0	10.05~12.14

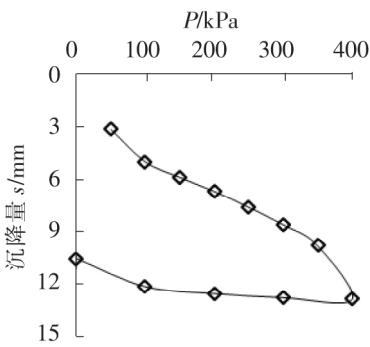


图 9 复合地基平板载荷试验曲线图

由表 2 可以看出,在采用不同能级强夯+注浆+DJP 桩变刚度复合地基处理后,总装车间地基的最大沉降为 15.59 mm,满足规范和设计要求。

根据《建筑地基基础设计规范》5.3.4 条规定,工业与民用建筑相邻柱基的沉降差不大于 $0.002l$ (l 为相邻柱基的中心距离)。由表 2 可以看出,相邻柱基的沉降差最大为 5.21 mm,小于 $0.002 \times 24\,000 = 48$ mm,满足规范和设计要求。

6 结论和建议

采用不同能级强夯+注浆+DJP 桩的变刚度复合地基处理方案,考虑了强夯、注浆和 DJP 桩的优点。强夯的作用是消除表层~中深部填土地基的湿陷性,降低填土的压缩性,使上部土体形成“硬壳层”,可抵抗上部荷载传递的应力作用;注浆加固主要是减少了超出强夯处理深度范围外土体的架空现象,避免深部地基因未完成自重固结而造成上部建(构)筑物的不均匀沉降及局部倾斜;DJP 桩主要是控制填土深度大的重要建(构)筑物区域的整体沉降及差异沉降。

通过对工程实例的研究分析,得出以下结论:

(1)变刚度复合地基处理方案以变形控制为设计依据,总体思路是处理后地基刚度与荷载效应相匹配,荷载大的区域地基刚度大,荷载小的区域地基刚度小,以达到控制差异沉降的目的。

(2)采用不同能级强夯+注浆+DJP 桩的变刚度复合地基处理方案,能有效解决削山填谷区域建筑地基整体沉降和差异沉降过大的问题,满足建(构)筑物的使用要求。

(3)该项工程应用证明,不同能级强夯+注浆+DJP 桩的变刚度复合地基处理技术,是一种行之有效的新组合、新工艺,为山区建设中削山填谷区域地基处理提供了新的思路和经验。

参 考 文 献

- [1]刘金砺,迟铃泉. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2):151-157.
- [2]陈龙珠,梁发云,丁屹. 变刚度复合地基处理的有限元分析[J]. 工业建筑, 2003, 33(11):1-4.
- [3]乔京生,陶龙光,刘大江,等. 基于差异沉降的变刚度复合地基方案研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2006, 21(2):17-21.
- [4]李卫民,常青. 低能级强夯+桩复合地基处理新填土地基[J]. 岩土力学, 2009, 30(2):354-357.
- [5]张武,高文生. 变刚度布桩复合地基模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6):905-910.
- [6]吴旭君,范黎明,殷其雷. 新建城区大面积填土地基基础方案分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(2):290-292.
- [7]江立群. 强夯联合注浆在深填方地基处理中的应用[J]. 低温建筑技术, 2015, 205(7):132-134.
- [8]李继才,酆能惠,丛建,等. 大型储罐桩复合地基变形性状和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2017, 26(9):1111-1116.
- [9]安明. 超大粒径砂岩块石抛填地基强夯处理技术[J]. 施工技术, 2009, 38(12):107-109.
- [10]年延凯,李鸿江,杨庆,等. 不同土质条件下高能级强夯加固效果测试与对比分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1):139-144.
- [11]付浩,王秀丽,于开宁,等. 深厚碎石填土不同能级强夯加固效果对比研究[J]. 施工技术, 2016, 45(S1):5-10.
- [12]王铁宏,水伟厚,王亚凌,等. 强夯法有效加固深度的确定方法与判定标准[J]. 工程建设标准化, 2005, 12(3):27-38.
- [13]岩土注浆理论与工程实例协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [14]李相辉. 松散软弱介质注浆扩散和加固试验研究[D]. 济南:山东大学, 2015.
- [15]别聪颖. 土石混合体注浆扩散机理及影响因素试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
- [16]王广国,杜明芳,苗兴城. 压密注浆机理研究及效果检验[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5):670-673.
- [17]张亮,朱允伟,李楷兵,等. 潜孔冲击高压旋喷桩工法原理及特性研究[J]. 施工技术, 2017, 46(19):59-62.

Compound Treatment Technology of Variable Stiffness Foundation in Valley Area Filled with Cut Mountain

Liu Youxiang, Wang Faling, Liu Zhongfu, Guo Yun, Long Xiaodong, Chen Kai

(Central South Survey Design Institute Group Co. Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: There is significant difference in the filling thickness of in valley area filled with cut mountain. If the foundation in these areas is not treated properly, the buildings and structures above it would easily produce uneven settlement of foundation, which would result in safety problems. Taking relocation project of Shiyang Base as the background, this paper studied the compound treatment technology of variable stiffness foundation in valley area filled with cut mountain, which includes dynamic compaction with different energy levels, grouting and DJP pile, is studied. The effects of this ground treatment technology were analyzed based on data from many tests such as dynamic detection test, single pile static load test and plate loading test. The test data show that the scheme can effectively reduce the overall settlement and differential settlement of the foundation, which means it is a new effective technology. This research can provide technical reference and experience for treatment of foundation in valley area filled with cut mountain.

Key words: variable stiffness; compound ground; dynamic compaction; slip casting; DJP pile

(上接第 68 页)

Study on the Effect of Joint Dip Angle of Railway Tunnel with Standard Section

Li Laosan

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

Abstract: Taking the standard section of Huangjiagou Tunnel of Zhengwan Railway as the research object, this paper analyzed the stability of rock tunnels with different occurrence, studied the mechanical response, deformation characteristics and bolt mechanical characteristics of surrounding rock, and expounded the instability mode and bolt support key points of layered rock tunnels which were different from the traditional loose medium. The results show that the joint plane weakens the stability of rock mass greatly, and the excavation will cause sliding along the bedding plane, resulting in obvious geological bias. The tunnel excavation causes the first failure of the interlayer joints. The separation zone of the joints does not occur in the direction of the maximum principal stress, but in the vertical direction of the joints. When the horizontal or dip angle is small, there is a separation zone between the top and the invert joint, which is easy to cause the bending failure of the rock stratum; with the dip angle increasing, the sliding trend along the weak joint surface increases, and the failure mainly depends on the strength of the joint surface and the sliding between the layered joints; when the dip angle is $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$, the failure is mainly caused by the bending collapse of the side wall rock mass; when the vertical joint, the middle vertical soil mass is held up with weakening, it is easy to shear failure and instability, resulting in the tendency of roof caving. From the point of view of group anchor effect, when the angle between anchor bolt and slip surface is greater than 23° , the effect of anchor bolt support is more obvious.

Key words: layered rock mass; geological bias tunnel; bedding slip; instability mode; bolt support