

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.02.008

【工程应用】

高压旋喷法加固高速公路软土路堤边坡的效果分析

张世华¹, 陈孝雄², 祝斌³

(1. 浙江浙文工程检测技术有限公司, 浙江 温州 325011; 2. 浙江创新工程检测有限公司, 浙江 杭州 310021;

3. 杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 为提高软土地区已运营高速公路边坡的稳定性, 需采用一种施工方便且能较快提高其安全系数的加固措施。高压旋喷桩近些年来作为一种软土地区地基加固措施因其施工方便且效果理想而被广泛采用, 但其在软土边坡加固工程中的应用案例较少。本文以宁波某运营多年的沿海高速公路路堤边坡采用高压旋喷桩加固为例, 对加固施工期间的路面裂缝及路堤边坡的沉降、水平位移进行监测并分析。监测结果表明随着高压旋喷桩桩施工产生扰动, 导致路堤边坡裂缝、沉降及水平位移继续发展, 但随着桩体强度增长, 路堤边坡的沉降、位移速率得到有效控制, 边坡稳定性较处治前明显提高。

关键词: 软土地区; 稳定性; 高压旋喷桩; 裂缝; 沉降; 水平位移

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)02-0145-08

Effect of high pressure jet grouting method on reinforcing soft soil embankment slope of expressway

ZHANG Shi-hua¹, CHEN Xiao-xiong², ZHU Bin³

(1. Zhejiang Zhewen Engineering Testing Technology Co., Ltd., Wenzhou 325011, Zhejiang, China;

2. Zhejiang Innovation Engineering Testing Co., Ltd., Hangzhou 310021, Zhejiang, China;

3. Hangzhou Survey, Design and Research Institute Co. Ltd., Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: To improve the stability of expressway slope in soft soil area, it is necessary to adopt a kind of reinforcement measure which is convenient for construction and can improve its safety factor quickly. In recent years, as a kind of foundation reinforcement measure in soft soil area, high pressure rotary jet grouting pile has been widely used because of its convenience and ideal reinforcement effect. However, there are few application cases in soft soil slope reinforcement. In this paper, the reinforcement of the embankment slope of a coastal expressway in Ningbo that has been in operation for years is taken as an example. The embankment slope is reinforced by high pressure rotary jet grouting piles, and the pavement cracks and the settlement and horizontal displacement of the embankment slope during the reinforcement construction are monitored and analyzed. The monitoring results show that the pavement cracks, settlement and horizontal displacement of embankment slope continue to develop due to the disturbance in the construction process of high pressure rotary jet grouting piles. However, with the increase of pile strength, the settlement and displacement rate of embankment slope can be effectively controlled, and the stability of slope is significantly improved compared with that before reinforcement.

Key words: soft soil area; stability; high pressure jet grouting pile; crack; settlement; horizontal displacement

0 引言

根据中国交通运输部披露的数据显示, 截至2020年底, 我国高速公路通车里程达 1.61×10^5 km,

居世界第一。随着我国高速公路网的逐渐扩大、完善, 越来越多的高速公路穿山越岭、跨越河流, 形成了各式各样的路堤边坡、路堑边坡。高速公路边坡的稳定直接关系到公路的安全, 因此近些年很多

收稿日期: 2021-12-27

作者简介: 张世华(1987—), 男, 江西玉山人, 硕士, 工程师, 主要从事地基桥梁工程研究。E-mail: zhangnishihua@126.com。

技术人员对高速公路边坡稳定性进行了深入的研究,例如张菊连等^[1]在初期勘察阶段及少量室内和现场试验的基础上提出了一种快速、准确地对高速公路边坡进行稳定性评价的方法;赵瑜等^[2]采用基于强度折减法 and FLAC 3D 中的桩结构单元对不同开挖深度及抗滑桩支护后开挖到设计路基时的安全系数进行了计算;张勇慧等^[3]根据公路岩质边坡的特点运用层次分析法确定了评价指标的权重矩阵并采用模糊综合评判方法建立了公路岩质边坡的稳定性分级模型。

近些年来也有很多高速公路边坡因稳定性不足采用了加固处理方式,如罗根传等^[4]为了分析改扩建工程中使用抗滑桩对边坡加固治理时的支护稳定性,采用 FLAC 3D 软件对某改扩建边坡利用抗滑桩加固效果进行数值模拟;褚夫蛟等^[5]根据路基实际情况建模计算,揭示出在复工路基植入土工格栅进行加固补强在限制横向位移方面有一定的效果,但对于限制竖向沉降作用不大;李国维等^[6]采用玻璃纤维增强聚合物(GFRP)锚杆对风化较严重的岩坡或类土质坡进行加固并通过现场观测应力、坡面变形和坡体整体位移验证 GFRP 锚杆作为永久性加固结构的可靠性。

目前针对已运营多年的软土地区高速公路边坡因稳定性不足导致路面开裂、坡面滑移的快速处理措施及其效果的研究较少^[7]。宁波某运营多年的沿海高速公路路堤边坡因路面存在开裂、沉降而采用高压旋喷桩进行处理,本文针对该路堤边坡处理后的效果进行研究,以期能为类似工程提供参考。

1 工程概况

1.1 高压旋喷桩施工情况

宁波某运营多年的沿海高速公路竣工后于 2013 年 10 月 9 日 K0+820~K0+900 段首次出现裂缝,在 11 月 25 日 K0+690~K0+750 段发现新裂缝,12 月初, K0+620~K0+670 段再次发现新裂缝,裂缝纵横向后续仍在发展。

经研究,拟在 K0+790~K0+960 段挡墙基底采用高压旋喷桩进行处理,处治横断面图详见图 1。高压旋喷桩自 2014 年 7 月 16 日开始施工,采用间隔跳打的方式进行施工,至 9 月 10 日已完成处治期内所有高压旋喷桩的施工,共 166 根。根据处治期的监测成果,从 9 月 14 日起对部分沉降、位移未收敛的断面共补打 20 根高压旋喷桩。补桩区域在 K0+805~K0+845 及 K0+905 附近。

该工程高压旋喷桩设计桩径为 1 000 mm,水泥采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,每延米水泥用量约为 470 kg。

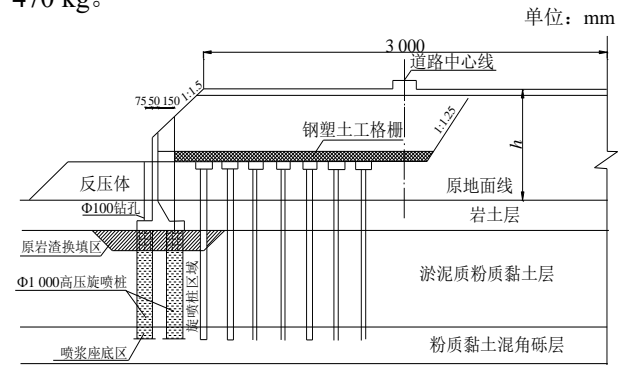


图 1 路基高压旋喷桩处治横断面图

Fig. 1 Cross section of high pressure rotary jet grouting piles treatment in roadbed

1.2 地质条件

地基土由浅到深主要为:①层杂填土(Q^{ml})、②层粉质黏土(Q_4^{3l+h})、③层淤泥质粉质黏土(Q_4^{2m})、⑤₁层粉质黏土混角砾(Q_3^{2al+1})、⑤₂层角砾(Q_3^{2al+1})、⑩₁强风化熔结凝灰岩(J3)、⑩₂中风化熔结凝灰岩(J3),见图 2。

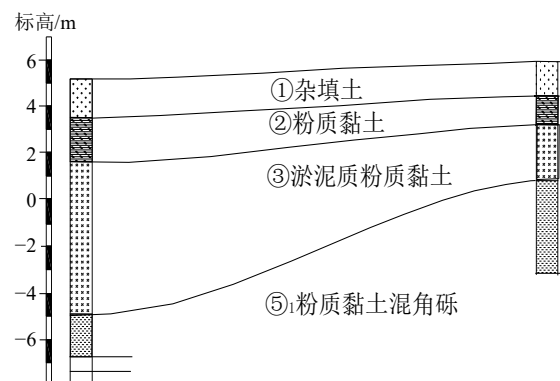


图 2 典型工程地质剖面图

Fig. 2 Typical engineering geology section

1.3 天气情况

旋喷桩加固施工阶段施工区域的降雨情况为:7月24日—7月28日:阵雨及雷雨;7月31日—8月3日:大雨及阵雨;8月12日—8月19日:连续大雨、中雨及阵雨,导致 K0+835~K0+885 处第四车道积水较深,约 4 cm 左右;8月24日—8月29日:连续中雨、阵雨及雷雨,其中 8月29日下午大暴雨,导致断面 K0+895 护栏处有积水约 2 cm 深。

1.4 监测情况

监测项目包括:反压体水泥路面两侧(观测点 D、E)、裂缝两侧(观测点 A)、挡土墙墙顶(观测点 C)、边坡坡顶(观测点 B)沉降、水平位移,具体监测点布置详见图 3。

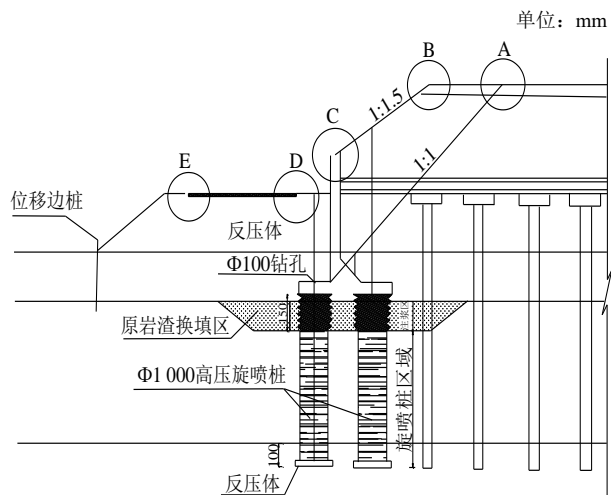


图 3 监测点布置断面图

Fig. 3 Layout section of monitoring points

2 监测情况

2.1 裂缝监测情况

自 2014 年 7 月 16 日现场旋喷桩施工开始, 7 月 16 日—8 月 24 日之间陆续在 K0+835、K0+805、K0+820、K0+870、K0+915、K0+940、K0+925、K0+885、K0+910 等断面出现由原裂缝纵向发展形成的新裂缝, 主要集中在第一车道, 同时随着施工、降雨、过车等外因影响, 新生成的裂缝不断扩展、延伸。裂缝分布示意图详见图 4。

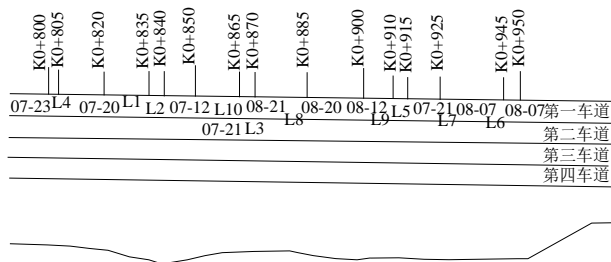


图 4 裂缝分布示意图

Fig. 4 Fracture distribution diagram

(1) L1 裂缝及其附近监测断面数据变化情况
附近旋喷桩施工情况: 7 月 15 日在 K0+843 及 K0+835 位置各打入 1 根高压旋喷桩, 7 月 27 日在 K0+835 断面附近 4 m 范围内施打了 3 根高压旋喷桩, 7 月 26 日—7 月 28 日在 K0+825 断面附近 4 m 范围内施打了 3 根高压旋喷桩, 8 月 12 日—8 月 13 日在 K0+815 断面附近 4 m 范围内施打了 4 根高压旋喷桩。

裂缝发展情况见图 5。7 月 20 日在 K0+840 断面被发现, 缝宽约 2 mm, 随后开始向 K0+820 断面扩展延伸, 截至 8 月 18 日在 K0+820 断面处裂缝宽

度已达 15 mm, 随后被油毡覆盖。

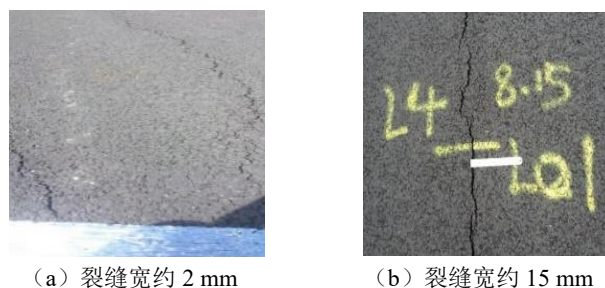


图 5 L1 裂缝发展情况
Fig. 5 L1 fracture development

(2) L2 裂缝及其附近监测断面数据变化情况
附近旋喷桩施工情况: 7 月 27 日在 K0+835 断面附近 4 m 范围内施打了 3 根高压旋喷桩, 8 月 5 日—8 月 10 日在 K0+835 断面 4 m 范围内施打了 3 根高压旋喷桩。

裂缝发展情况见图 6。7 月 17 日在 K0+835 断面处被发现, 缝宽约 10 mm; 7 月 27 日前该裂缝变化较小, 7 月 27 日—8 月 5 日该裂缝变化较大; 8 月 5 日该裂缝最宽处已达 17 mm; 8 月 5 日—8 月 15 日该裂缝变化十分巨大; 截至 8 月 15 日该裂缝宽度已达 31 mm; 8 月 15 日—8 月 24 日 L2 裂缝有延伸的趋势; 8 月 25 日后 L2 裂缝基本无变化; 9 月 12 日后该裂缝被混凝土覆盖。

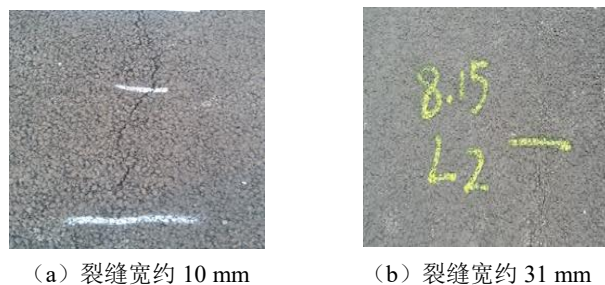


图 6 L2 裂缝发展情况
Fig. 6 L2 fracture development

2.2 典型断面沉降观测情况

K0+815、K0+825 和 K0+835 的断面累计沉降、沉降速率分别见图 7~9。

从图 7~9 监测数据可以看出:

(1) 高压旋喷桩施打前各监测点累计沉降值较小。

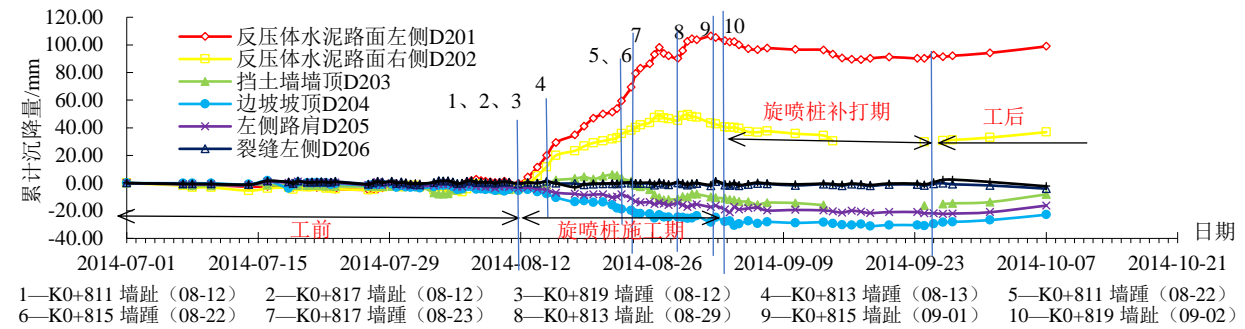
(2) 当大量施打高压旋喷桩时, 高压旋喷产生的压力远大于土体的自重应力, 导致反压体水泥路面迅速隆起, 挡墙也略有隆起; 受旋喷桩施工扰动影响坡顶、路肩等沉降量迅速增大 (速率也较大)。

(3) 旋喷桩补打期间, 反压体水泥路面隆起较之前减小。

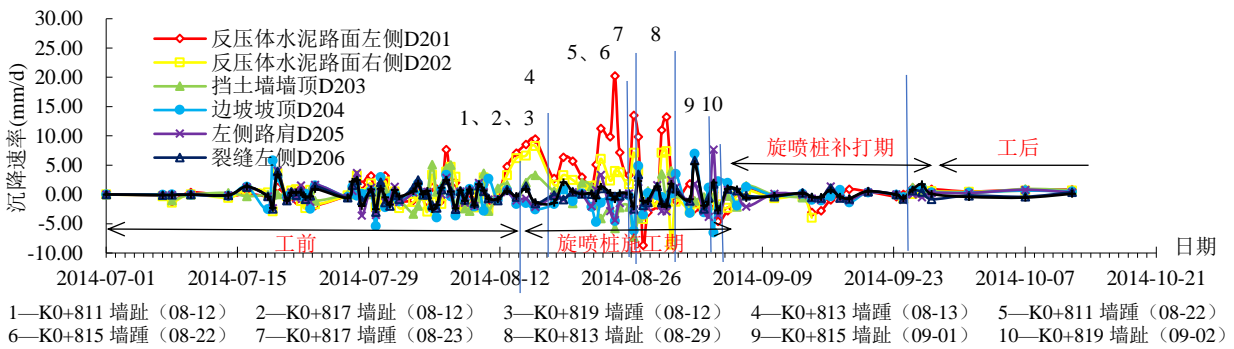
(4) 旋喷桩施工完成后, 随着高压旋喷浆液的硬化, 桩体强度的形成, 沉降的变化逐渐趋于稳定, 速率亦较小。

2.3 典型断面水平位移观测情况

K0+815、K0+825 和 K0+835 的断面累计水平位移、位移速率分别见图 10~12。



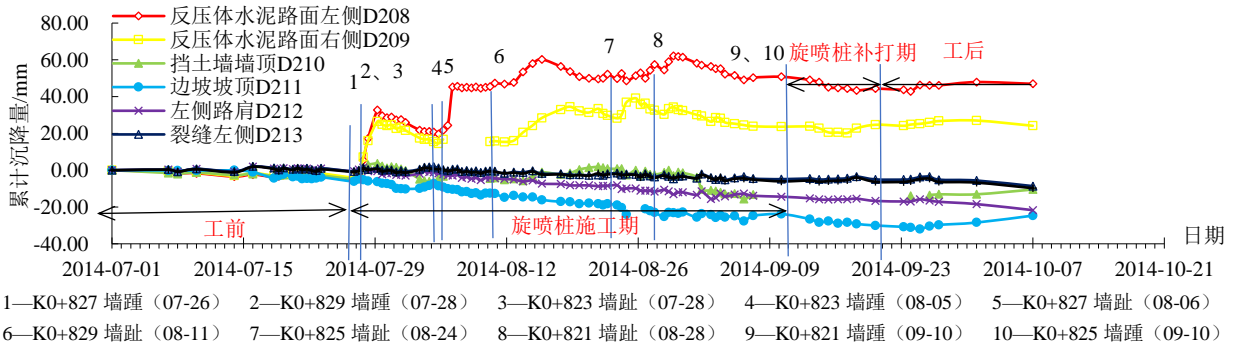
(a) K0+815 断面沉降时程曲线



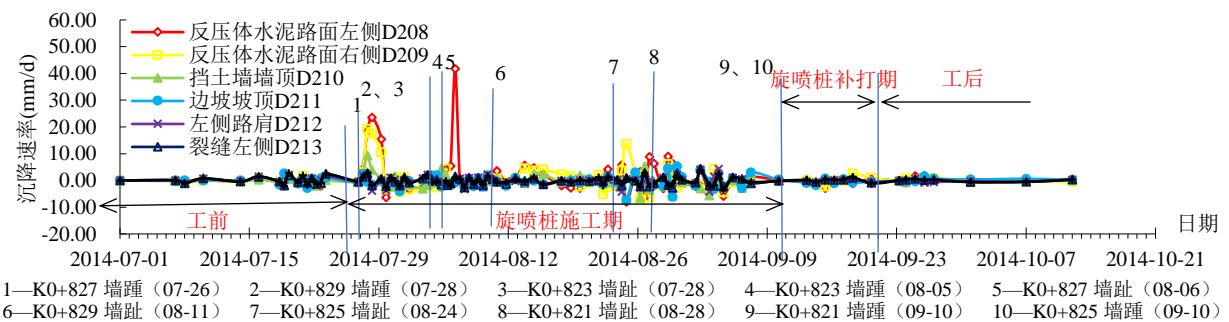
(b) K0+815 断面沉降速率时程曲线

图 7 K0+815 断面累计沉降、沉降速率观测图

Fig. 7 Observation diagrams of cumulative settlement and settlement rate of K0+815 section



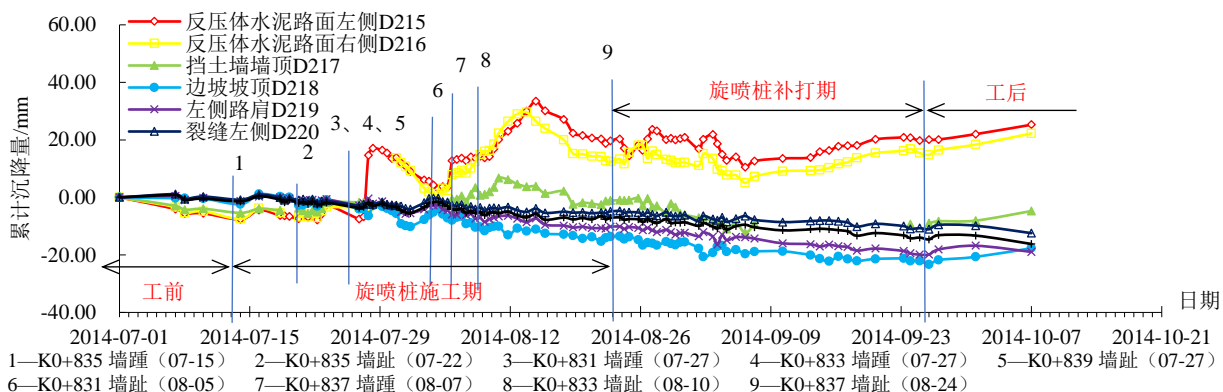
(a) K0+825 断面沉降时程曲线



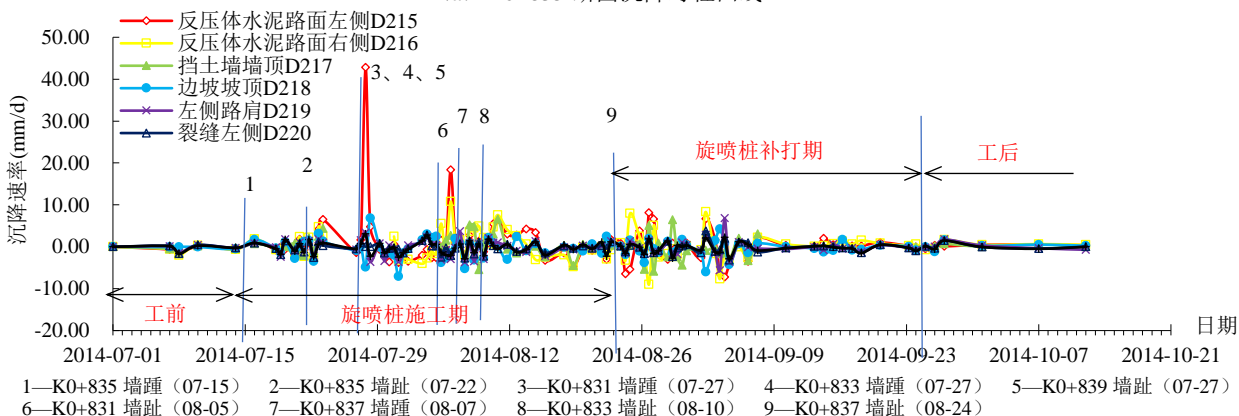
(b) K0+825 断面沉降速率时程曲线

图 8 K0+825 断面累计沉降、沉降速率观测图

Fig. 8 Observation diagrams of cumulative settlement and settlement rate of K0+825 section



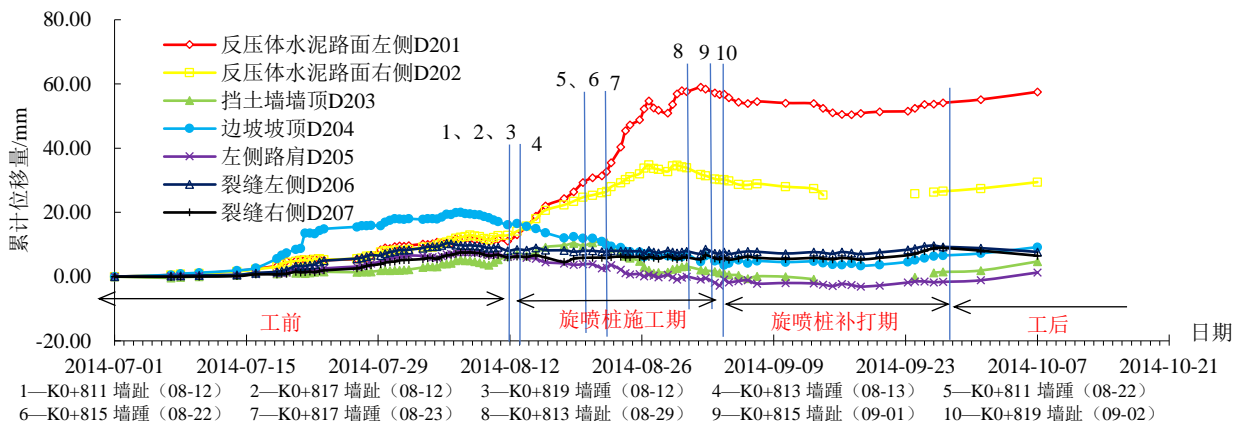
(a) K0+835 断面沉降时程曲线



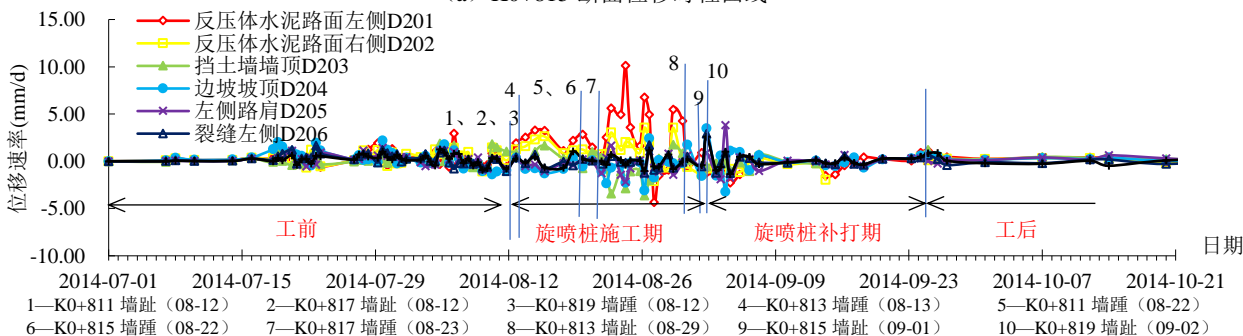
(b) K0+835 断面沉降速率时程曲线

图 9 K0+835 断面累计沉降、沉降速率观测图

Fig. 9 Observation diagrams of cumulative settlement and settlement rate of K0+835 section



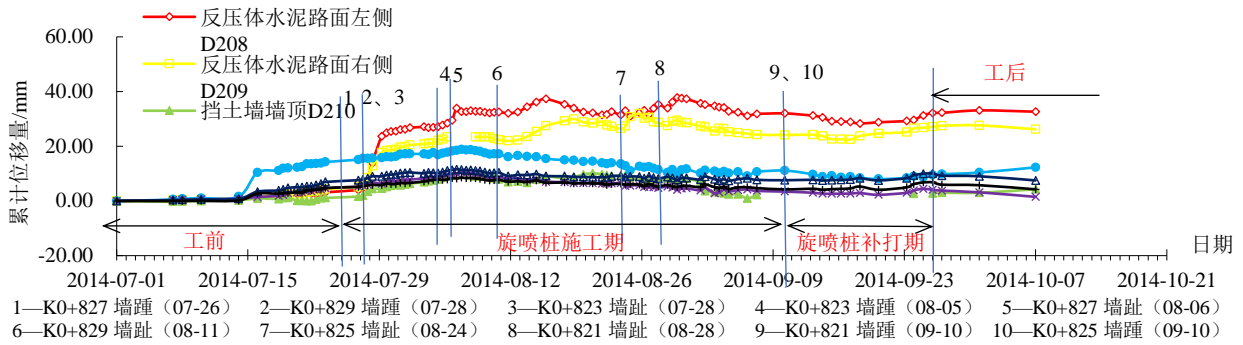
(a) K0+815 断面位移时程曲线



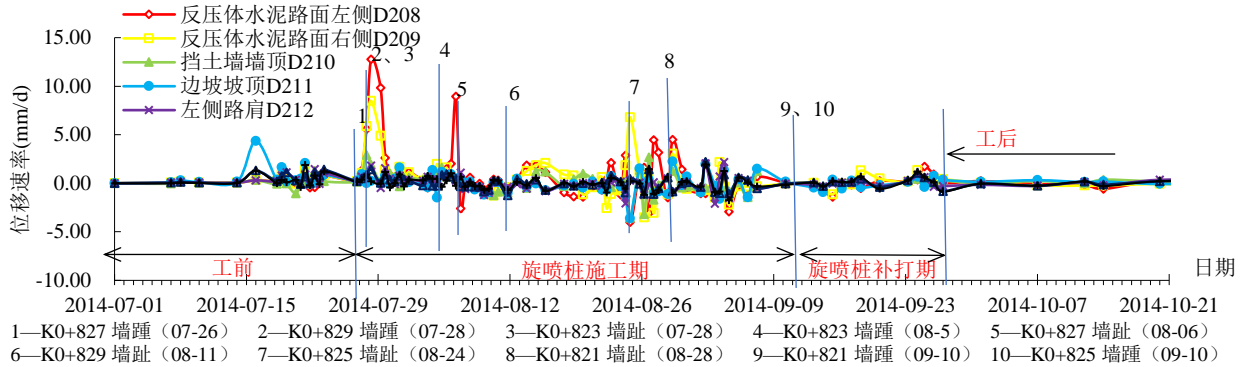
(b) K0+815 断面位移速率时程曲线

图 10 K0+815 断面累计水平位移、位移速率观测图

Fig. 10 Observation diagrams of cumulative horizontal displacement and displacement rate of K0+815 section



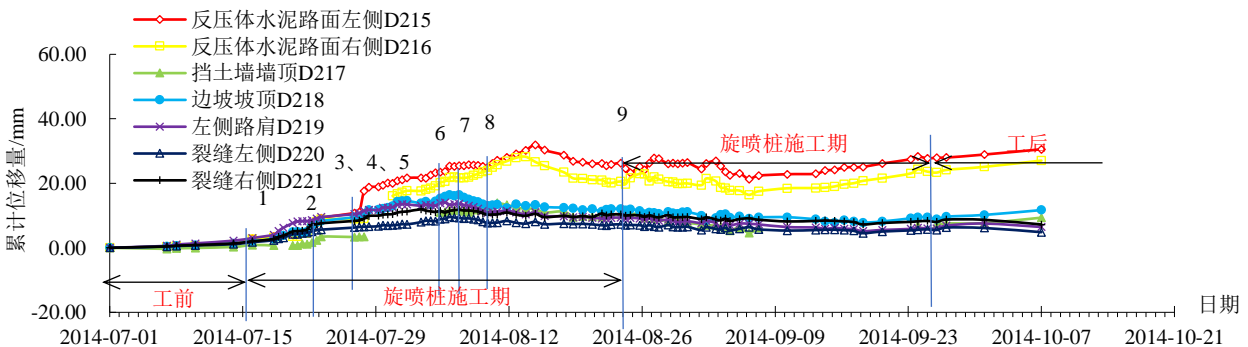
(a) K0+825 断面位移时程曲线



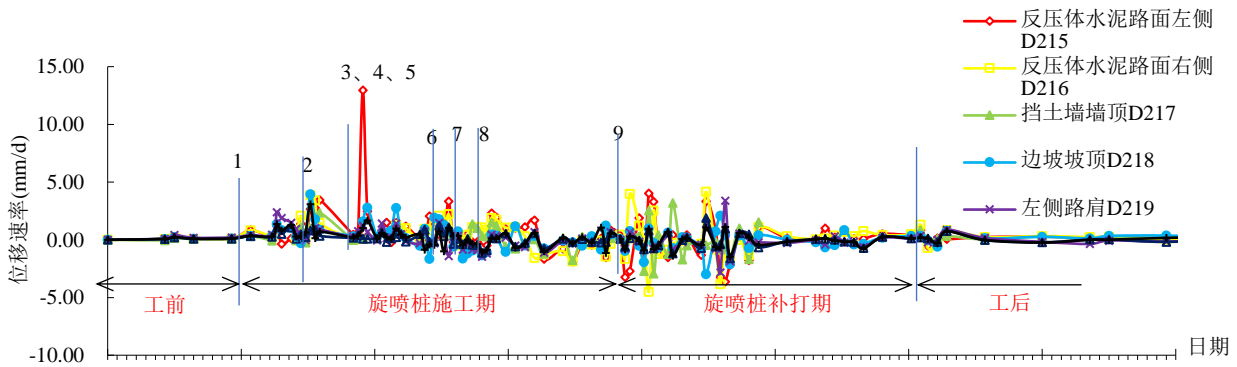
(b) K0+825 断面位移速率时程曲线

图 11 K0+825 断面累计水平位移、位移速率观测图

Fig. 11 Observation diagrams of cumulative horizontal displacement and displacement rate of K0+825 section



(a) K0+835 断面位移时程曲线



(b) K0+835 断面位移速率时程曲线

图 12 K0+835 断面累计水平位移、位移速率观测图

Fig. 12 Observation diagrams of cumulative horizontal displacement and displacement rate of K0+835 section

从图 10~12 监测数据可以看出:

(1) 在旋喷桩施打期间反压体的水平位移逐渐增大, 而其余测点变化不明显。

(2) 旋喷桩补打期间, 各监测点的位移变化逐渐减少(速率值在很小的范围波动), 位移得到有效的控制。

(3) 旋喷桩施工完成后, 各监测点位移变化速率在更小的范围波动, 基本稳定。

3 讨论

(1) 从路面裂缝发展情况可以得出:

a) 前期路基边坡存在潜在滑动面, 旋喷桩施打扰动周边土体, 降低土体的强度, 同时降雨渗入裂缝, 增加土体下滑力^[9], 降低土体抗滑力, 促使路基边坡向下、向外变形, 导致裂缝发展。

b) 经裂缝发展、旋喷桩施工、降雨的综合分析可以看出, 裂缝的扩展与旋喷桩施工、降雨时间段吻合, 可以判断裂缝扩展受二者影响显著。

(2) 从累计沉降及速率时程曲线对比可以得出:

a) 旋喷桩施工前虽累积值不大, 但有逐渐发展趋势。

b) 旋喷桩施工扰动周边土体导致各监测点沉降均出现迅速增大的情况。

c) 旋喷桩强度增长需要较长的时间, 2 个月内旋喷桩强度增长有限。

d) 各监测断面的反压体水泥路面隆起量均随着旋喷桩施工呈“锯齿状”增大, 其主因是旋喷桩施工期间注浆压力扩散导致其迅速隆起, 周围土体孔隙水压力增大, 随着孔隙水压力消散, 土体发生固结沉降^[10], 待下一根旋喷桩施工时又会重复该过程, 因此其隆起量总体呈现出“锯齿状”递增的现象。

(3) 从累计水平位移、速率时程曲线对比可以得出:

a) 旋喷桩施工前监测断面上各测点的水平位移有逐渐发展趋势。

b) 旋喷桩施打期间各监测点位移累计值及速率变化均十分显著, 主要受旋喷桩施工扰动^[11]影响所致。

c) 旋喷桩补打期间, 各监测点的位移变化得到有效控制, 表明随着桩体强度的增长, 有效阻止了路基向外侧变形。

d) 旋喷桩施工完成后, 各监测点位移变化速率在更小的范围波动, 基本稳定。

4 结论

(1) 经挡墙底部旋喷桩处治后, 随着桩体强度增长, 路基沉降、位移得到有效控制, 较处治前稳定性明显提高。

(2) 经工况、降雨情况、裂缝以及监测数据综合分析可以确定, 裂缝及监测数据(沉降及位移)受施工及降雨影响显著。

(3) 旋喷桩施工完成后, 各监测点位移变化速率在更小的范围波动, 基本趋于稳定。

高压旋喷桩施工后随着桩体强度发挥可有效控制边坡位移、提高稳定性, 但施工时扰动较大, 类似边坡稳定加固时需要进行有效控制。

参考文献

- [1] 张菊连, 沈明荣. 高速公路边坡稳定性评价新方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3623-3629, 3636.
ZHANG Ju-lian, SHEN Ming-rong, A new method for slope stability evaluation of expressway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3623-3629, 3636.
- [2] 赵瑜, 王铁成, 李维朝, 等. 高速公路滑坡稳定性评价及其治理模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2340-2346.
ZHAO Yu, WANG Tie-cheng, LI Wei-chao, et al. Stability evaluation and treatment simulation of expressway landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2340-2346.
- [3] 张勇慧, 李红旭, 盛谦, 等. 基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性分级研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3151-3156.
ZHANG Yong-hui, LI Hong-xu, SHENG Qian, et al. Stability classification of highway rock slope based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3151-3156.
- [4] 罗根传, 何忠明, 曾铃. 高速公路改扩建工程边坡抗滑桩加固效果数值分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015, 46(6): 2244-2249.
LUO Gen-chuan, HE Zhong-ming, ZENG Ling. Numerical analysis of reinforcement effect of anti-slide piles in expressway reconstruction and expansion

- project[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2015, 46(6): 2244-2249.
- [5] 褚夫蛟, 刘敦文, 侯志勇, 等. 高速公路复工路基土工格栅的加固补强稳定性[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2016, 37(5): 741-745.
CHU Fu-jiao, LIU Dun-wen, HOU Zhi-yong, et al. Reinforcement stability of roadbed geogrid for highway construction[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2016, 37(5): 741-745.
- [6] 李国维, 刘朝权, 黄志怀, 等. 应用玻璃纤维锚杆加固公路边坡现场试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增刊 2): 4056-4062.
LI Guo-wei, LIU Chao-quan, HUANG Zhi-huai, et al. Field test of highway slope reinforcement with glass fiber anchor[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S2): 4056-4062.
- [7] 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.
PAN Hua-lin, QIAN He-ping, CAI Ze-en, et al. Field test study of high pressure rotary jet grouting pile for strengthening highly sensitive soft soil foundation[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2021, 3(1): 71-75.
- [8] 张建华, 梁杰忠. 水平旋喷桩工艺在广州地铁 2 号线工程施工中的应用[J]. *水运工程*, 2002(8): 72-75.
ZHANG Jian-hua, LIANG Jie-zhong. Application of horizontal rotary jet grouting pile technology in construction of Guangzhou Metro Line 2[J]. *Water Transportation Engineering*, 2002(8): 72-75.
- [9] 廖红建, 盛谦, 高石夯, 等. 库水位下降对滑坡体稳定性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 19(24): 3454-3458.
LIAO Hong-jian, SHENG Qian, GAO Shi-hang, et al. Effect of reservoir water level decline on landslide stability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 19(24): 3454-3458.
- [10] 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(6): 670-673.
WANG Guang-guo, DU Ming-fang, MIAO Xing-cheng. Study on grouting mechanism and effect test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(6): 670-673.
- [11] 李世鑫, 孙春辉, 周星宇, 等. 软土地区邻近铁路高压旋喷桩施工室内模型试验研究[J]. *铁道建筑*, 2021, 61(7): 95-98.
LI Shi-xin, SUN Chun-hui, ZHOU Xing-yu, et al. Laboratory model test research on construction of high pressure rotary jet grouting pile near railway in soft soil area[J]. *Railway Construction*, 2021, 61(7): 95-98.