

# 桥梁群桩基础压力注浆静置时间预测试验

陈福江, 马建林, 赵丹

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为了预测高速铁路桥梁群桩基础在压力注浆加固后的静置时间, 提出无砟轨道铺设时间的合理建议. 通过开展京沪高速铁路丹阳至昆山特大桥阳澄湖桥段群桩基础现场压力注浆试验, 对试验段群桩基础架梁前后沉降全过程观测, 得到近 600 d 实测沉降数据, 结合《京沪沉降评估细则》及《客运专线无砟轨道评估技术指南》关于沉降稳定的判别标准, 将实测沉降与曲线拟合法预测沉降进行对比分析, 预测出群桩基础的静置时间. 预测结果表明: 从架梁后起算, 未注浆群桩基础静置时间约为 55~100 d; 桩侧注浆群桩基础静置时间约为 50~90 d; 桩端注浆群桩基础静置时间约为 30~55 d. 建议未注浆、桩侧注浆、桩端注浆群桩基础的无砟轨道铺设时间分别不宜少于架梁后 100 d, 90 d 和 60 d.

**关键词:** 高速铁路; 群桩基础; 静置时间; 压力注浆; 现场试验

**中图分类号:** U238; TU473.1+4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)01-0090-06

随着高速铁路建设事业的迅猛发展, 软土地基上修建的桥梁桩基越来越多, 如何确定压力注浆加固后桥梁桩基的沉降稳定时间即静置时间, 提出无砟轨道铺设时间的合理建议, 这也是高速铁路建设中迫切需要解决的重大课题. 本文以京沪高速铁路丹阳至昆山特大桥阳澄湖桥段为工程背景, 通过群桩基础现场压力注浆试验, 对先架方向架梁前后沉降全过程观测, 将实测沉降与曲线拟合法预测沉降进行对比分析, 预测出群桩基础的静置时间, 进而提出无砟轨道铺设时间的合理建议, 保证工程在已定的工期内竣工. 因此, 本文的研究不仅具有重要的理论价值, 还具有重要的工程应用价值.

目前, 国内外针对养护方案评价的研究较少, 其中具有实用价值的代表性方案有: 许宏科等<sup>[1]</sup>作者从设备状况、管理体制和运营效果三个方面入手, 选择 23 项对高速公路运营影响较大的因素作为评价指标, 在层次分析法和模糊数学理论的基础上建立了高速公路隧道运营管理模糊综合评价模型, 但是文章选择的指标过多, 影响区域交叉, 会产生干扰, 且在 AHP 这种相对主观的赋权方法下, 结果不确定性较大; 丛卓红等<sup>[2]</sup>选择了 11 个路用性能指标, 采用熵权法赋值, 结合灰色聚类分析和主成分分析综合形成既反映全体指标信息又体现指标差异性的综合指标, 对 5 种材料进行评价, 并通过四川广巴高速公路的实测数据进行检验, 但在进行指标剔除和结合后所得结果可能产生较大变化, 准确性尚需更多数据验证. 至于复合式路面反射裂缝病害修补技术评价的研究尚未有一个明确的方向. 有的作者采用了神经网络法进行综合评价, 但神经网络法的可行性在业内一直受到质疑, 结果准确性难以保证; 有的作者全面考虑了各方面的指标, 但是指标过多, 算法过于复杂, 导致难以在日常的养护技术综合评价中广泛使用; 更多的作者则是采用层次分析法和模糊数学法来构建评价体系, 但是 AHP 法的权重赋值主观性较强, 所得结果受使用者喜好影响较大. 虽然对于修补技术的综合评价已经有了一些研究成果, 但是在指标的选择上, 方法应用上还存在问题.

本文从经济效益和用户体验两个方面着手, 选择了 6 个具有针对性的评价指标, 通过专家打分和标准化处理讲个指标进行量化处理, 在层次分析法所构建的评价体系框架内, 结合模糊数学、熵权法和统计学法对 3 种反射裂缝病害修补技术进行了评价和结果分析. 文章的意义在于提供了一种主客观结合的相对简单实用的科学的病害成因评价方法, 并对几种反射裂缝病害的修补技术进行了优选.

## 1 压力注浆试验概况

桩基压力注浆包括桩端压力注浆桩和桩侧压力注浆桩. 桩侧压力注浆桩是指钻孔、冲孔或挖孔桩成桩

收稿日期: 2013-08-06

修改稿日期: 2014-02-13

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目 (2008G032-3)

作者简介: 陈福江 (1981-), 男, 博士研究生, 主要从事道路与铁道工程方面的研究, E-mail: chenfujiangxn@163.com

后, 在压力作用下将能固化的浆液 (如纯水泥浆、水泥砂浆、加外加剂及掺合料的水泥浆、超细水泥浆、化学浆液等), 通过桩身预埋的注浆装置或在桩侧钻孔埋设的花管强行注入桩侧土层中, 充填桩身混凝土与桩周土体的间隙, 同时与桩侧土层和泥浆护壁法成孔中生成的泥膜发生物理化学反应, 提高桩侧土的强度, 改善桩与侧壁土之间的接触面, 从而提高桩的承载力以及减小桩基的沉降量. 桩端压力注浆桩是指钻孔、冲孔或挖孔桩在成桩后, 通过预埋在桩身的注浆管利用压力作用, 将能固化的浆液经桩端的预留压力注浆装置均匀地注入桩端地层. 视浆液性状、土层特性和注浆参数等不同条件, 压力浆液对桩端土层、中风化与强风化基岩、桩端虚土及桩端附近的桩周土层起到渗透、填充、置换、劈裂、压密及固结等形式组合的不同作用, 改变其物理力学性能及桩与岩、土之间的边界条件, 消除虚土隐患, 从而提高桩的承载力以及减少桩基的沉降量.

1.1 工程地质情况

试验段位于京沪高速铁路丹阳至昆山特大桥阳澄湖桥段, 属长江三角洲深厚软土层, 地质条件如下: (1) 粉质粘土, 褐黄色, 软塑, 厚度 2.77 m; (2) 淤泥质粉质粘土, 褐灰色~灰绿色, 流塑, 厚度 10.4 m; (3) 粉质粘土, 褐灰色, 硬塑, 厚度 5.0 m; (4) 粉土, 褐黄色, 饱和, 厚度 9.2 m; (5) 粉土, 灰黄色, 饱和, 厚度 16.8 m; (6) 粉土, 灰褐色, 饱和, 厚度 11.0 m; (7) 粉砂, 青灰色, 中实~密实, 厚度 12.14 m; (8) 粉质粘土, 褐灰色, 软塑~硬塑.

1.2 试验概述

试验段桥梁为 32 m 简支箱梁, 基础为泥浆护壁钻孔灌注桩, 桩长  $L=68$  m, 桩径  $D=1$  m, 群桩承台布置如图 1 所示.

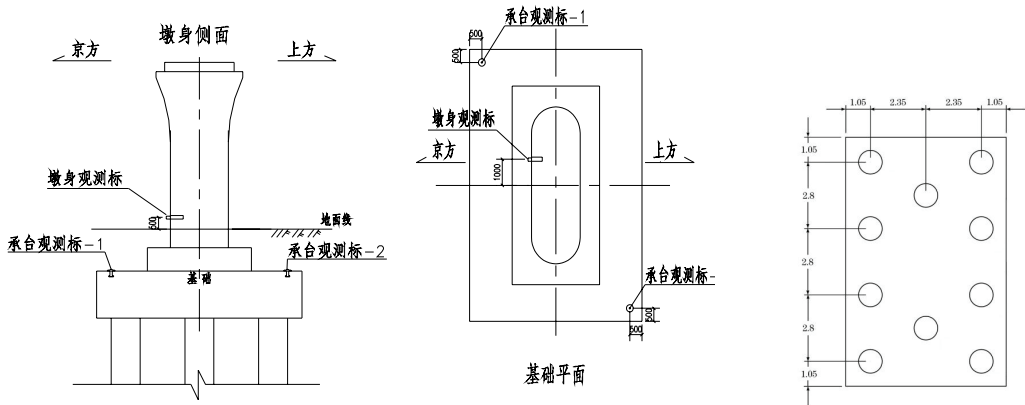


图 1 承台沉降观测点及群桩布置图 (单位: m)  
Fig.1 The group of pile caps arrangement and settlement observation point (Unit:m)

选取试验段 20 个承台, 通过不同注浆方案加固下墩台沉降的实际观测, 对比分析不同加固方案的沉降控制效果, 比选出最优的后注浆加固方案, 指导施工. 群桩基础注浆方案列表于表 1.

进行桩侧注浆试验的承台共 5 个, 注浆点位置如图 2 所示, 进行桩端注浆试验的承台共 6 个, 注浆点位置如图 3 所示.

对上述 20 个试验承台开展架梁前后全过程沉降观测, 每个承台设置 2 个观测标: 1 个设置在底层承台左侧小里程角上, 另一个设置在底层承台右侧大里程角上. 承台施工完成后, 立即进行沉降首次观测, 然后间隔 8 d 观测 1 次, 得到近 600 d 沉降数据.

2 静置时间预测

参考《京沪沉降评估细则》及《客运专线无砟轨道铺设条件评估技术指南》<sup>[3]</sup>中关于沉降稳定的判别标准, 研究注浆加固前后桩土共同作用下的荷载—沉降—时间变化特性, 结合现场实测与理论分析, 根据桥梁群桩基础在注浆加固前后的沉降变化规律, 预测评估群桩基础在注浆加固后的静置时间及长期稳定

表 1 群桩基础实验数量表		
Tab.1 The experiment table number and pile foundation		
注浆位置	注浆方式	承台数量
桩侧	预埋管式	5
桩端	敞开式	6
未注浆		9

性,提出无砟轨道铺设时间的合理建议.本方法基于曲线拟合法,而曲线拟合法的两个重要参考指标为:曲线回归的相关系数 $R$ 和对应日期的实测沉降量 $S_{\text{实测}}$ 与曲线拟合法预测沉降量 $S_{\text{预测}}$ 的相对误差 $\delta$ <sup>[4]</sup>.因此,本方法将相关系数 $R$ 和相对误差 $\delta$ 作为预测桥梁群桩基础静置时间的主要指标.

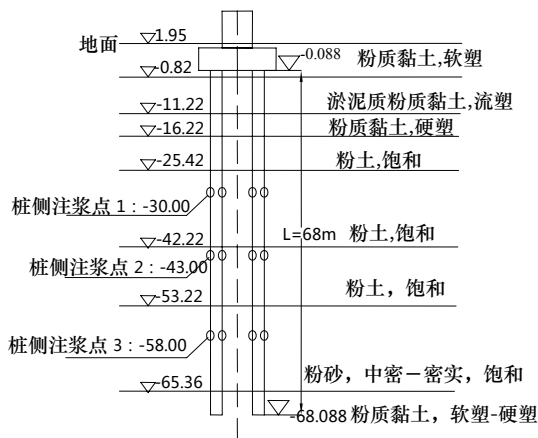


图2 桩侧注浆位置示意图

Fig.2 Sketch map of pile grouting

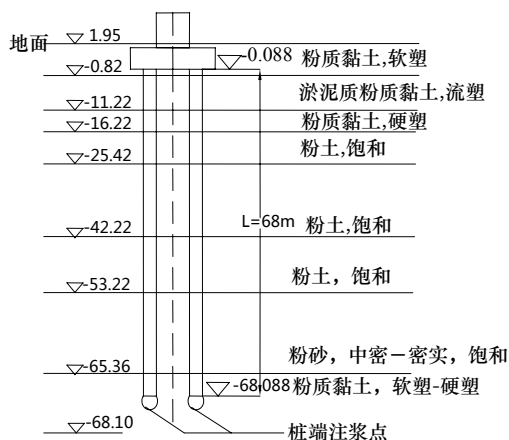


图3 桩端注浆位置示意图

Fig.3 Sketch map of pile end grouting

## 2.1 预测方法

(1) 根据现场实测沉降数据的特征,选用较好的曲线拟合方法,拟合实测沉降-时间曲线并预测最大沉降量.曲线拟合法适用性及拟合结果的判别标准如下:① 曲线回归的相关系数 $R \geq 0.92$ ;② 最近一期 $S_{\text{实测}}/S_{\infty} \geq 75\%$ .

(2) 将停载后的实测沉降数据与(1)中拟合曲线中对应日期的预测沉降数据对比分析,若第一次连续四期出现 $S_{\text{实测}}$ 与 $S_{\text{预测}}$ 的相对误差 $\delta \leq 5\%$ ;  $S_{\text{实测}}/S_{\infty} \geq 80\%$ ;沉降平均速率不超过 $v \leq 0.08 \text{ mm/d}$ .可将四期中第一期日期确定为桥梁群桩基础静置日期,便可确定静置时间.

## 2.2 曲线拟合法优选

罗浩等<sup>[5]</sup>首次提出了变形过程指数法,对桥梁基础沉降曲线全过程进行拟合和预测,且常见曲线拟合法主要有指数曲线法、双曲线法、灰色模型预测法、Asaoka法等,而工程实践表明,双曲线法具有适应性强、适用性广、方法简单易懂、推算结果比其他方法更接近实测沉降等优点<sup>[6]</sup>.结合试验沉降实测数据具有小量级、小波动型的特点及架梁前观测时间达到6个月<sup>[7]</sup>.因此,选用双曲线法预测架梁后的沉降,将得到较好的效果.

双曲线的基本原理<sup>[8]</sup>简述如下.任意时刻的沉降量计算公式为

$$r_i(j) = \frac{y_i(j) - \min[y_i(j)]}{\max[y_i(j)] - \min[y_i(j)]} \quad (3)$$

式(1)可变化为

$$r_i(j) = \frac{\max[y_i(j)] - y_i(j)(j)}{\max[y_i(j)] - \min[y_i(j)]} \quad (4)$$

最终沉降量 $S_{\infty}$ 为

$$S_{\infty} = S_0 + 1/b \quad (5)$$

式中 $t_0$ 为计算用的时间起点(d); $t$ 为任意时刻(d); $S_0$ 为初始沉降量,即 $t_0$ 时刻对应的沉降量(mm); $a$ 、 $b$ 分别为 $[(t-t_0)/(S_t-S_0)]-(t-t_0)$ 关系图上的截距和斜率,其值可通过线性回归方程求出.

## 3 预测结果分析

### 3.1 未注浆承台

按双曲线法拟合未注浆承台荷载—沉降—时间曲线,拟合起点选为架梁日期,终点为最近一期沉降后

6 个月即 2010-12-22, 拟合结果如图 4 所示. 双曲线法拟合最终沉降量为 3.57 mm, 最近一期实测沉降与预测最终沉降比为 96.08%, 相关系数 0.96, 拟合效果较好.

由表 2 可知所列 2009-07-15~2009-08-10 连续四期 与 的相对误差 在 0.47~3.24%范围内, 均小于 5%; 沉降平均速率最大为 0.012 mm/d, 均未超过 0.08 mm/d; 而 2009-06-17 中 与 的相对误差 为 9.87%大于 5%, 可确定静置日期为 2009-07-15. 架梁日期为 2009-04-14, 从架梁后开始计算得到 481#承台静置时间为 92 d .

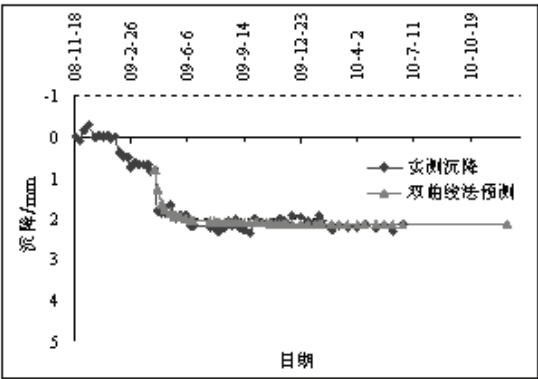


图 4 481#未注浆承台实测及拟合沉降曲线图  
Fig.4 UngROUTING pile caps measured and the subsidence curve fitting of 481 #

表2 481#承台实测与预测沉降的比较

Tab.2 Comparison between pile caps measured and predicted settlement of 481#						
日期	$S_{\text{实测}} / \text{mm}$	$S_{\text{预测}} / \text{mm}$	$\delta / \%$	$S_{\infty} / \text{mm}$	$S_{\text{实测}} / S_{\infty} / \%$	$v / (\text{mm/d})$
09-6-17	3.41	3.07	9.87	3.57	94.48	0.044
09-7-15	3.41	3.29	3.24		94.48	0.001
09-7-24	3.38	3.32	1.55		94.54	-0.004
09-7-31	3.46	3.36	2.89		96.92	0.012
09-8-10	3.37	3.39	0.47		94.40	-0.009

3. 2 桩侧注浆承台

按双曲线法拟合桩侧注浆承台荷载—沉降—时间曲线, 拟合起点选为架梁日期, 终点为最近一期沉降后 6 个月即 2010-12-22, 拟合结果如图 5 所示. 双曲线法拟合最终沉降量为 3.10 mm, 最近一期实测沉降与预测最终沉降比为 93.22%, 相关系数 0.95, 拟合效果较好.

由表 3 知所列 2009-07-24~2009-09-15 连续四期  $S_{\text{实测}}$  与  $S_{\text{预测}}$  的相对误差  $\delta$  在 0.37~4.08%范围内, 均小于 5%;  $S_{\text{实测}}/S_{\infty} > 82\%$ ; 沉降平均速率最大为 0.022 mm/d, 均未超过 0.08 mm/d; 而 2009-07-15 中  $S_{\text{实测}}$  与  $S_{\text{预测}}$  的相对误差  $\delta$  为 6.38%大于 5%, 沉降比为 79.68%小于 80%, 可确定静置日期为 2009-07-24. 架梁日期为 2009-04-24, 从架梁后开始计算得到 494#承台静置时间为 91 d .

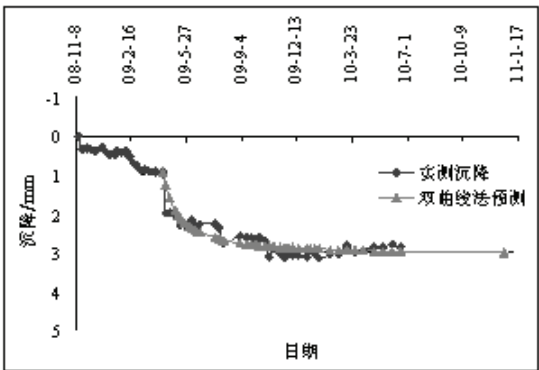


图 5 494#桩侧注浆承台实测及拟合沉降曲线图  
Fig.5 Pile side grouting pile caps measured and the subsidence curve fitting of 494#

表3 494#承台实测与预测沉降的比较

Tab.3 Comparison between pile caps measured and predicted settlement of 494#						
日期	$S_{\text{实测}} / \text{mm}$	$S_{\text{预测}} / \text{mm}$	$\delta / \%$	$S_{\infty} / \text{mm}$	$S_{\text{实测}} / S_{\infty} / \%$	$v / (\text{mm/d})$
09-7-15	2.47	2.63	6.38	3.10	79.68	0.001
09-7-24	2.57	2.66	3.38		82.90	0.019
09-8-2	2.67	2.68	0.37		86.13	-0.005
09-9-2	2.65	2.76	4.08		85.48	-0.007
09-9-15	2.71	2.78	2.88		87.26	0.022

3. 3 桩端注浆承台

按双曲线法拟合桩端注浆承台荷载—沉降—时间曲线, 拟合起点选为架梁日期, 终点为最近一期沉降后 6 个月即 2010-12-22, 拟合结果如图 6 所示. 双曲线法拟合最终沉降量为 2.19 mm, 最近一期实测沉降

与预测最终沉降比为 97.72%，相关系数 0.94，拟合效果较好。

由表 4 知所列 2009-05-14~2009-06-3 连续四期  $S_{\text{实测}}$  与  $S_{\text{预测}}$  的相对误差  $\delta$  在 0~3.14% 范围内,均小于 5%;  $S_{\text{实测}}/S_{\infty} > 88\%$ ; 沉降平均速率最大为 0.032 mm/d, 均未超过 0.08mm/d; 而 2009-05-06 中  $S_{\text{实测}}$  与  $S_{\text{预测}}$  的相对误差  $\delta$  为 11.38%大于 5%，沉降比为 77.17%小于 80%，可确定静置日期为 2009-05-14。架梁日期为 2009-04-14，从架梁后开始计算得到 480#承台静置时间为

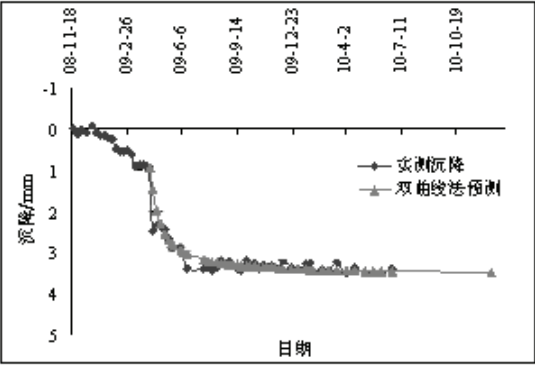


图 6 480#桩端注浆承台实测及拟合沉降曲线图  
Fig.6 Pile end grouting pile caps measured and the subsidence curve fitting

为  
30

表4 480#承台实测与预测沉降的比较  
Tab.4 The compare between pile caps measured and predicted settlement of 480#

日期	$S_{\text{实测}}$ /mm	$S_{\text{预测}}$ /mm	$\delta$ /%	$S_{\infty}$ /mm	$S_{\text{实测}}/S_{\infty}$ /%	$v$ / (mm/d)
09-5-6	1.69	1.88	11.38		77.17	-0.022
09-5-14	1.94	1.94	0.00		88.58	0.032
09-5-17	2.01	1.96	2.59	2.19	91.78	0.023
09-5-24	1.96	1.99	1.49		89.50	-0.008
09-6-3	1.96	2.02	3.14		89.50	0.001

d .

3. 4 静置时间汇总

将试验段桥梁群桩基础注浆后静置时间汇总于表 5

表 5 试验段群桩基础静置时间  
Tab.5 Let stand for time at the test section of pile foundation

承台编号	里程	注浆方式	静置时沉降量 /mm	预测总沉降量 /mm	静置时间/d
476	DK1245+829	未注浆	2.96	3.67	57
477	DK1245+862		2.80	3.03	92
481	DK1245+992		3.41	3.57	92
483	DK1246+058		3.38	3.55	101
492	DK1246+352		2.94	3.52	55
495	DK1246+450		3.81	4.22	55
496	DK1246+483		2.92	3.19	62
497	DK1246+516		2.22	2.66	98
500	DK1246+614		2.30	2.53	55
487	DK1246+189	桩侧	2.92	3.13	85
488	DK1246+221		3.03	3.62	85
493	DK1246+385		2.02	2.51	55
494	DK1246+418		2.57	3.10	91
482	DK1246+099		2.77	3.32	33
490	DK1246+087	桩端	2.66	3.16	40
480	DK1246+060		1.94	2.29	36

由表及上述各承台	504	DK1246+745	1.31	1.62	55
----------	-----	------------	------	------	----

拟合曲线图分析,未注浆承台架梁完成后的沉降量相对较大,且固结沉降过程延续时间较长.根据已有的数据,从架梁后起算,未注浆承台的沉降达到稳定的时间约为55~100 d;注浆承台架梁后的沉降幅度相对较小,固结沉降趋势减弱.根据曲线的发展趋势,从架梁后起算,桩侧注浆承台的沉降达到稳定的时间约为50~90 d;桩端注浆承台的沉降达到稳定的时间约为30~55 d;由此可以得出结论:压力注浆对于减小群桩基础的总沉降有显著作用;而对于缩短固结沉降时间,桩端压力注浆的效果更为明显,而桩侧压力注浆的效果不稳定.

## 4 结论与建议

(1) 参考《京沪沉降评估细则》及《客运专线无砟轨道铺设条件评估技术指南》中关于沉降稳定的判别标准,提出一种通过实测沉降数据与曲线拟合法预测沉降量的对比分析,预测桥梁群桩基础静置时间的方法.从架梁后起算,未注浆承台的沉降达到稳定的时间约为55~100 d;桩侧注浆承台的沉降达到稳定的时间约为50~90 d;桩端注浆承台的沉降达到稳定的时间约为30~55 d.

(2) 对于京沪高速铁路工程沿线与试验标段类似条件下的桥梁群桩基础工程的静置时间,从架梁后起算,建议桥梁无砟轨道铺设时间为:未注浆群桩基础不宜少于100 d,桩侧注浆不宜少于90 d,桩端注浆不宜少于60 d.

(3) 鉴于当前的桩基后注浆技术已经基本成熟,为减小深厚软土层中长大灌注桩基础的总沉降量和工后沉降量,缩短桥梁的静置时间并降低工程造价,建议在实际工程中推广应用桩基后注浆技术.

## 参考文献 References

- [1] 许宏科,王维敏,王世伟.高速公路隧道运营管理模糊综合评价[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2005,37(3):381-385.  
XU Hongke, WANG Weimin, WANG Shiwei. Fuzzy evaluation on the operation management of highway tunnel[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2005,37(3):381-385.
- [2] 丛卓红,郑南翔,闫红光.半刚性基层材料路用性能综合评价方法[J].交通运输工程学报,2011,11(4):23-28.  
CONG Zhuohong, ZHENG Nanxiang, YAN Hongguang. Comprehensive evaluation method of semi-rigid base mixture's pavement performance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011,11(4):23-28.
- [3] 铁道科学研究院. 客运专线无砟轨道铺设条件评估技术指南[M].北京:中国铁道出版社,2006:8-13.  
Academy of Railway Sciences. PDL Ballastless Track Guide Condition Assessment Technology [M]. Beijing: Chinese Railway Press, 2006:8-13.
- [4] 王星运,陈善雄,余飞,等.曲线拟合法对路基小变形情形适用性研究[J].岩土力学,2009,30(9):2763-2769.  
Wang Xingyun, Chen Shanxiang, Yu Fei, et al. Study of applicability of curve fitting methods in small settlement of subgrade [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30 (9): 2763-2769.
- [5] 罗浩,马建林,周洪燕,等.沉降曲线预测方法—变形过程指数法[J].岩土力学,2009,30(S2):374-376.  
Luo Hao, Ma Jianlin, Zhou Hongyan, et al. Settlement curve prediction method—index of deformation process method [J]. Rock and Soil Mechanics Settlement Curve, 2009,30 (S2): 374-376.
- [6] 蒋雪琴.真空联合堆载预压变形机理研究[D].广州:华南理工大学,2001.  
Jiang Xueqin. Study on the mechanism of deformation of vacuum combined with surcharge preloading pressure[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2001.
- [7] 刘吉福,莫海鸿,李翔,等.两种新的沉降推算方法[J].岩土力学,2008,29(1):140-144.  
Liu Jifu, Mo Haihong, Li Xiang, et al. Two new Methods of Settlement Prediction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008,29 (1): 140-144.
- [8] 潘林有,谢新宇.用曲线拟合的方法预测软土地基沉降[J].岩土力学,2004,25(7):1053-1058.  
PAN Linyou, XIE Xinyu. Observational settlement prediction by curve fitting methods [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(7):1053-1058.

## Test on waiting-time prediction pressure grouting for bridge pile foundation

CHEN Fu-jiang, MA Jian-lin, ZHAO Dan

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)



**Abstract:** In order to predict the waiting time for the pile group foundation of the high-speed railway bridge by pressure grouting and strengthening, a reasonable advice of the time for the ballast less track laying is put forward. Through carrying out the field test for the pressure grouting in strengthening the pile group foundation on one section of the Danyang-Kunshan long-span Bridge of Yangcheng Lake on the Beijing-Shanghai high-speed railway and the whole sedimentation process observation of the test section, 600 days' measurement sedimentation data were obtained. By combining the criterions of steady subsidence of "Beijing-Shanghai Sedimentation Assessment Rules" with that of "the guideline of Evaluation Techniques to Unballasted Track on Passenger Dedicated Line", the sedimentation data by actual measurement and the predicted data by curve fitting method were compared and analyzed. Then the waiting time of the pile foundation was predicted. The results show that after the girder erection, the waiting time of non-grouting pile group foundation is about 55 to 100 days; the waiting time of pile sides grouting is about 50 to 90 days; and the waiting time of pile bottom grouting is about 30 to 55 days. It is advisable that the waiting time of non-grouting, pile sides grouting and pile bottom grouting on the unballasted track should not be less than 100 days, 90 days and 60 days respective after girder erection.

**Keyword:** high speed railway; pile group foundation; waiting time; pressure grouting; site test

(本文编辑: 吴海西)