

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202204062024061975

文章编号:1674-599X(2024)03-0128-07

引用格式:陈洁金,董自行,胡敏.墩身偏位原因及纠偏加固方案数值模拟研究[J].交通科学与工程,2024,40(3):128-134.

Citation: CHEN Jiejn, DONG Zihang, HU Min. Numerical simulation study on the cause of misalignment of pier and the scheme of rectification and reinforcement[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 128-134.

## 墩身偏位原因及纠偏加固方案数值模拟研究

陈洁金,董自行,胡敏

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘 要:**为探究某大桥墩身偏位的原因,在原位勘察结果的基础上,分析研究了导致墩身发生偏位的影响因素,这些因素包括桩底下卧软弱破碎带、桩侧及桩底岩层软化、桩侧钻孔、桩侧及桩底岩层在振动耦合作用下的加剧软化等。通过数值模拟发现,岩层软化对于墩身偏位的影响程度最大,桩底下卧软弱破碎带次之,桩侧钻孔对于墩身偏位的影响最小。在探明墩身发生较大偏位的主要原因后,针对补桩过程中墩身发生第二次较大偏位的现象,提出预注浆加固的方法进行纠偏加固。数值模拟结果表明,预注浆加固可使补桩引起的6#墩身偏位量减小80%。优化后的6#墩纠偏加固顺序为:原5#~8#桩底预注浆加固、补桩、增大墩身截面纠偏墩身。

**关键词:**墩身偏位;注浆加固;补桩;增大截面法

中图分类号:U441

文献标志码:A

## Numerical simulation study on the cause of misalignment of pier and the scheme of rectification and reinforcement

CHEN Jiejn, DONG Zihang, HU Min

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To explore the reasons for the deviation of a certain bridge pier, based on the results of in-situ investigation, it can be concluded that the main reasons for the deviation of the pier are that under the vibration coupling effect the characteristics of the weak and fractured zone beneath the pile, softening of the rock layers on the pile side and bottom, drilling on the pile side, and the rock layers on the pile side and bottom can exacerbate the softening, et al. Numerical simulation results indicated that the softening of the rock layers had the greatest influence on the displacement of the pier, followed by the weak and fractured zone beneath the pile, while the effect of drilling on the pile sides was minimal. After identifying the main reason for the large deviation of the pier, a method of pre-grouting reinforcement is put forward for the second large deviation of the pier in the process of pile patching. Numerical simulations demonstrated that pre-grouting reinforcement could reduce the displacement of pier 6# caused by pile repair by 80%. After optimization, the order of rectification and reinforcement of pier 6# is: pre-grouting reinforcement at the bottom of 5#-8# pile, patching pile, increasing pier section to modify pier.

**Key words:** pier offset; grouting reinforcement; pile patching; section enlargement method

收稿日期:2022-04-06

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目“优秀青年项目”(20B010)

通信作者:陈洁金(1975—),男,讲师,主要从事桥梁工程及岩土工程方面的研究工作。E-mail:2477377196@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

目前,我国的桥梁建造技术已经十分成熟,但不良地质条件、不合理的施工方案等导致桩基偏位的情况时有发生,给桥梁安全带来了极大的隐患。软弱破碎带作为一种极为不良的地质条件,具有变形模量小、风化严重、强度低、渗透性强、流变性、遇水软化等典型特征。该种地质条件对工程的长期稳定性影响较大,尤其在受扰振动的环境下极易发生工程病害<sup>[1]</sup>,因此众多学者开展了振动影响下软弱岩层的工程特性研究。许成顺等<sup>[2]</sup>基于饱和砂土自由场地大型振动台试验,研究了饱和砂土在地震荷载作用下的固-液相变特征,发现大激振条件下,饱和砂土上部液化土层的表观黏度大幅下降,液化后的沙土表现出“剪切稀化”的假塑性流体特征。杨军等<sup>[3]</sup>采用离心机-振动台试验,研究了水平地震输入对基础模型位移及桩身应变的影响。研究表明,地震对桩周土体有软化作用,震后群桩承载能力有所降低。冯忠居等<sup>[4]</sup>采用振动台模型试验开展单桩、四桩、六桩基础处理液化地基的差异性研究。研究表明,六桩基础抗液化性能比四桩及单桩基础的好。崔杰等<sup>[5]</sup>基于 OpenSEES 计算软件建立液化微倾场地群桩-土动力相互作用有限元模型,系统地研究了场地倾角、桩径、地震作用幅值等对饱和砂土动力  $p$ - $y$  曲线特性的影响。研究表明,土体即将液化时,桩基土反力达到峰值;土体液化后,土体表现出了流体特性,桩径越大,液化砂土的耗能效应越明显。

综上所述,学者们主要以振动条件下软弱岩层的软化特性为研究目标,对于振动导致桩基偏位方面的研究较少。鉴于此,本文以某大桥工程案例为依托,探究墩身发生两次偏位的原因,通过数值模拟方法,研究预注浆加固对补桩过程中墩身偏位的防治效果,并优化补桩加固方案。该研究可为类似工程提供良好借鉴。

## 1 工程概况

某大桥全长 829.0 m,全桥跨径组合为  $(5 \times 30.0 + 75.0 + 4 \times 130.0 + 75.0)$  m。第一联引桥为 5 跨 30.0 m 预应力(后张)简支 T 梁,先简支后连续,第二联主桥为 6 跨预应力混凝土连续梁-刚构组合体系,其中 7#、8#、9#桥墩与主梁固结,6#、10#桥墩与主梁通过盆式支座连接;本桥分左右两幅,全幅宽 24.5 m。下部

结构 0 号、11 号桥台采用 U 形台,全桥桥墩采用实体板墩,墩台均采用钻孔灌注桩基础,如图 1 所示。



图1 大桥整体布局图

Fig. 1 Overall layout of the bridge

桥梁墩身施工完成后,对全桥进行测量发现,6#~10#墩身都有不同程度的偏位,且 6#墩身偏位最为严重,墩顶向江内一侧偏位 52 mm。选取偏位最大的 6#墩进行补勘,发现 6#-6 桩(表示 6#墩 6 号桩,下同)及 6#-8 桩底土体松散,有软化现象,如图 2~3 所示。

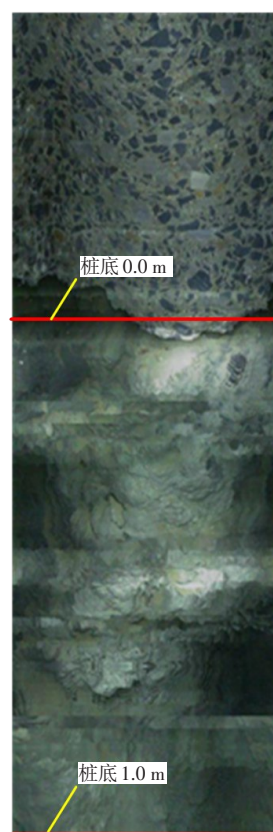


图2 6#-6 桩底摄像图

Fig. 2 Photography of 6#-6 pile's bottom

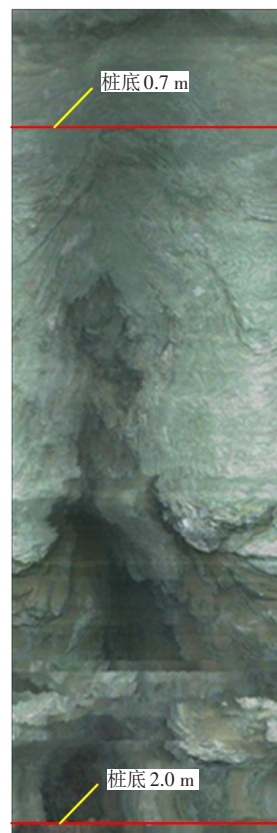


图3 6#-8 桩底摄像图

Fig. 3 Photography of 6#-8 pile's bottom

墩身发生偏位后,相关单位决定对6#~10#墩进行补桩加固处理。如图4~5所示,原承台平面尺寸为10.0 m×10.0 m,基础采用桩径为2.5 m的钻孔灌注桩,单幅桥每墩设4根桩,纵桥向和横桥向桩中心间距均为5.9 m。加固方案如下:设计每墩新增8根桩基,单幅每墩4根桩基,设计桩径为2.5 m,新增桩基与原桩基在纵桥方向一一对应,新增桩基与原桩基在纵桥向的桩中心间距为5.1 m。加固承台时对原承台及新增桩基采用凿毛、植筋、浇筑混凝土的方法,将原承台包裹形成扩大承台,使得新老桩基共同受力,增加整体稳定性。

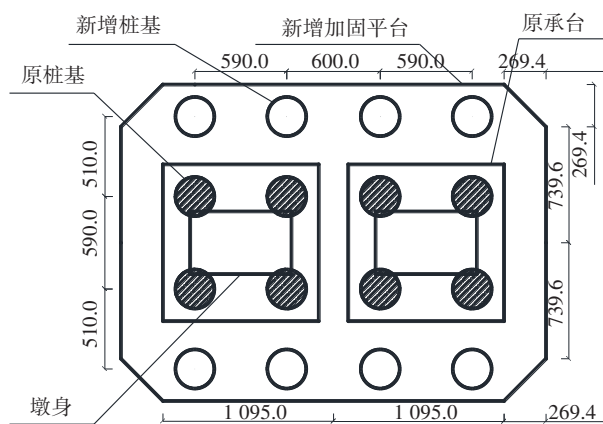


图4 承台平面图(单位:cm)

**Fig. 4** Plan of pile cap (unit: cm)

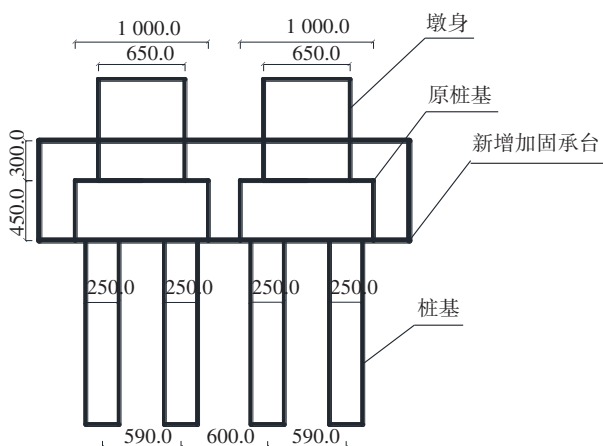


图5 承台立面图(单位:cm)

**Fig. 5** Elevation of pile cap (unit: cm)

在按照原方案对6#墩进行补桩加固的施工过程中,6#墩纵桥方向偏移由52 mm增大至140 mm及以上。如图6~7所示,左幅墩身向纵桥方向偏移140 mm,向横桥向偏移20 mm;右幅墩身向纵桥方向偏移170 mm,向横桥向偏移10 mm。图6中,实线

为设计墩身线,虚线为偏位后的墩身线。

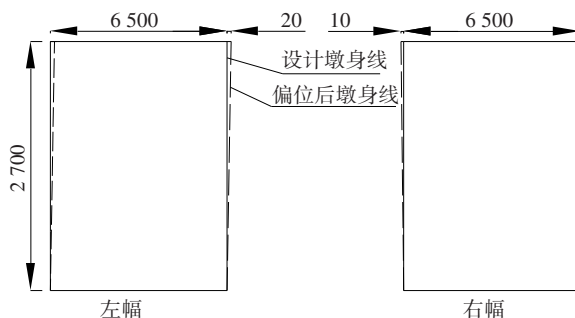


图6 墩身立面图(单位:mm)

**Fig. 6** Elevation of pier (unit:mm)

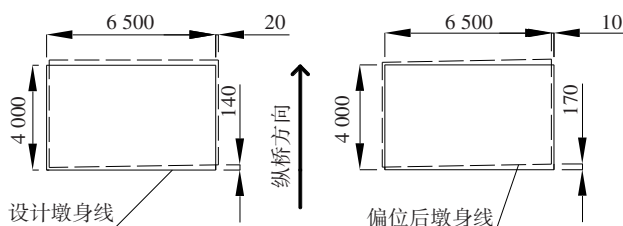


图7 墩身平面图(单位:mm)

**Fig. 7** Plan of pier (unit:mm)

该桥在整个施工过程中发生两次偏位,导致该桥偏位的影响因素较多且复杂,受限于篇幅,本文仅以发生较大偏位的6#墩右幅为例。

## 2 墩身偏位原因分析

### 2.1 6#墩身第一次偏位原因分析

设计上,该桥墩采用高桩承台,结构本身对于水平荷载的承受能力较差<sup>[6]</sup>,易在不均匀水平荷载的影响下发生偏位。同时,该区域的裸露基岩有遇水软化的特性,成孔施工对桩边土有扰动,使得桩边土极易发生液化和浆化,成桩后其桩侧摩阻力远小于设计值<sup>[7]</sup>,加之桩底存在软弱破碎带,最终导致6#墩身发生较大偏位。

## 2.2 6#墩身第二次偏位原因分析

6#墩补桩成孔采用冲击钻孔成孔工艺,补桩桩基在纵桥向与原桩基净距为2.6 m,补桩钻孔长度比原桩基深7.0 m,如图8所示。补桩钻孔接近原桩底时,6#墩身发生第二次较大偏位。

一方面,补桩过程中,桩侧钻孔破坏了原桩基侧面土体应力平衡,加之施工扰动的影响,加剧了桩侧土的液化和摩阻力的损失。另一方面,冲击振动弱化了桩侧土和桩底破碎带的黏聚力与内摩擦角<sup>[8]</sup>,加之水对破碎带的软化作用,使得桩底岩层的



承载能力大幅下降,最终导致6#墩发生二次偏位。

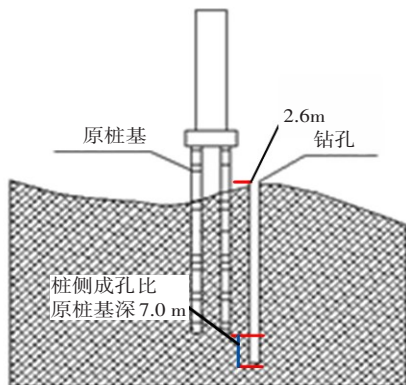


图8 钻孔示意图

Fig. 8 Schematic diagram of drilling hole

### 3 数值模拟研究

#### 3.1 墩身偏位数值模拟分析

根据上文分析,导致墩身偏位的影响因素主要有桩底下卧软弱破碎带、桩底及桩侧岩层软化、桩侧钻孔、桩底及桩侧岩层在振动耦合作用下的加剧软化等。为了研究各因素对墩身偏位的影响程度,通过数值模拟方法,计算各影响因素引起的墩身偏位量,并进行对比研究。

计算模型参数如表1所示。桩身直径为2.5 m,承台尺寸为10.0 m×10.0 m×4.5 m,单幅每墩4根桩,墩身高度为27.0 m,桩长43.0 m,入土深度为27.0 m,补桩钻孔比原桩基深7.0 m。模型尺寸为:纵桥向为40.0 m,横桥向为23.8 m,高度方向为47.0 m。计算模型将上部水的作用简化为作用在上部土体上的0.23 MPa的均布力。模型中各土层按照6#墩地质剖面图设置,各土层厚度分别为:冲积层20.0 m、破碎带24.0 m、中风化层最大厚度为27.0 m,各土层参数如表1所示。

表1 土层参数

Table 1 Soil parameters

名称	重度/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
桥梁	2 500	25.00	0.24		
冲积层	1 840	0.03	0.34	18	15
中风化层	2 980	6.97	0.26	300	50
破碎带	2 860	0.44	0.31	10	35

数值模拟计算设置四个计算步,分别为:计算步1,原始状态(桩底下卧软弱破碎带);计算步2,桩底及桩侧岩层软化;计算步3,桩侧冲击钻孔;计算步4,桩底及桩侧岩层加剧软化。

计算步2的软化区域如图9所示,根据原位勘探结果可知(图2~3),桩底以下2.0 m范围内软化较为严重,因此计算步2的软化区域设为桩侧1.25 m、桩底2.0 m,桩底软化系数取值为0.5<sup>[9]</sup>。计算步4的软化区域如图10所示,鉴于桩侧钻孔深度比原桩基底部深7.0 m,因此计算步4中将桩底以下9.0 m设为受扰动的破碎带岩层。该岩层在补桩成孔过程中受到的是水-岩层-振动三者的耦合作用,这种耦合作用对破碎带的软化有强化效应<sup>[10]</sup>,岩层结构强度几乎丧失,远低于工程规范提供的经验值<sup>[11]</sup>,因此该岩层软化系数取为0.3。

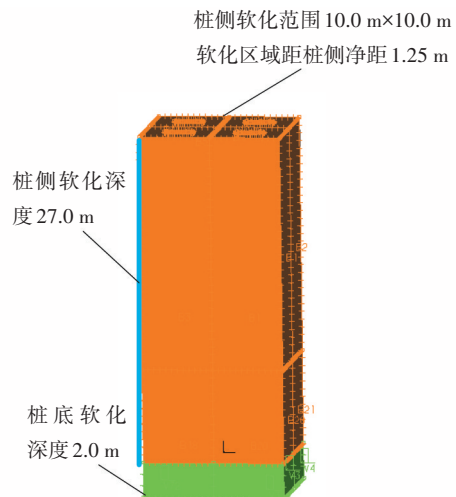


图9 计算步2

Fig. 9 Second calculate step

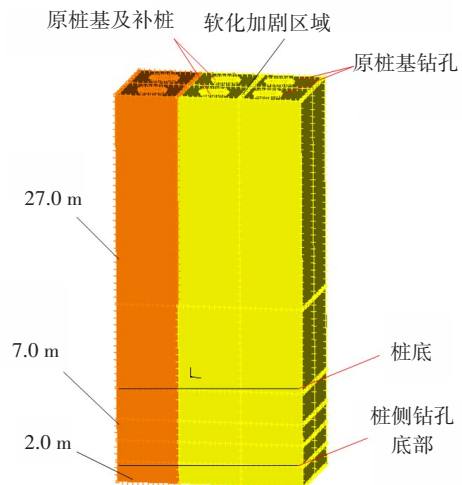


图10 计算步4

Fig. 10 Fourth calculate step

通过数值模拟分析,各计算步的墩身偏位量分别为:14、51、53、156 mm。由图 11 可知,在计算步 2 时,墩身偏位有了较大幅度的增加,偏位量增加 37 mm;计算步 3 时,墩身偏位仅增加 2 mm;在计算步 4 时,墩身偏位急剧地增加,增加幅度为 103 mm。综合分析,在软化条件下各因素均对墩身偏位有较大的影响,破碎带的存在对于墩身偏位有一定的影响,可导致墩身偏位 14 mm,这也是 6#墩相对于其他墩身发生较大偏位的原因,桩侧钻孔产生的泄压作用对墩身的偏位影响较小。

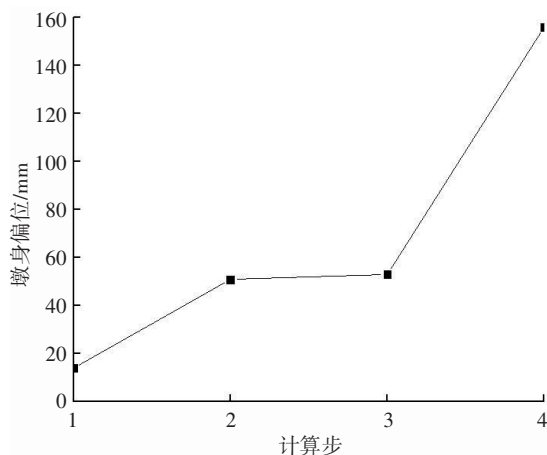


图 11 墩身偏位历程

Fig. 11 The deflection process of pier

### 3.2 预注浆加固数值模拟研究

注浆法是加固断层破碎带及软弱地层的主要手段,能够显著提高土层的整体性能<sup>[12-13]</sup>,且注浆加固可有效解决施工扰动情况下地基液化的问题<sup>[14]</sup>。因此,在补桩之前,若对桩底进行预注浆加固,可减小施工扰动对桩底破碎带的影响,从而防止墩身在第二阶段补桩成孔时发生较大偏位。为了研究预注浆加固对墩身偏位的防治效果,运用有限元方法模拟桩底预注浆加固效果,并对比分析不同的注浆加固深度对注浆加固的影响。

在数值模拟时,将桩底受扰动岩层逐次替换为注浆加固体(注浆加固区域参考岩层软化区域)。注浆加固体选用弹性本构材料模型,岩层弹性模量取值为 1 GPa<sup>[15]</sup>。计算结果如图 12 所示,随着注浆加固深度的增加,墩身偏位呈指数减小。模拟结果表明,在补桩前进行预注浆加固可有效减小墩身在补桩过程中发生的偏位变形。当桩底受扰动的岩层全部注浆加固后,墩身偏位减小了 80%。

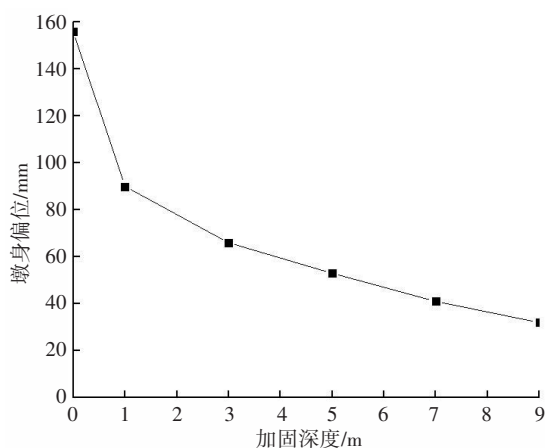


图 12 注浆加固深度对于墩身偏位的影响

Fig. 12 Influence of grouting reinforcement depth on pier deflection

## 4 纠偏加固方案优化

6#墩身原加固纠偏顺序为补桩、原 5#~8#桩桩底注浆加固、墩身纠偏。在补桩成孔过程中,未考虑施工扰动对墩身偏位的影响,导致墩身发生第二次较大偏位。根据数值计算结果,桩底预注浆加固可有效减小墩身在补桩施工中发生的偏位,所以 6#墩身最优的加固纠偏顺序应调整为:原 5#~8#桩桩底注浆加固、补桩、墩身纠偏。

### 4.1 桩底注浆加固

桩底注浆方案为:以承台为施工平台,测量放线,确定桩心位置,然后用地质钻机在桩心钻孔,钻孔直径为 110 mm。注浆孔平面布置如图 13 所示。

根据数值计算结果,注浆加固深度至少要 9.0 m,所以布管方案设计为:在注浆孔内布置 3 根直径为 20 mm 的注浆管,如图 14 所示,第 1 根注浆管钻入桩下 7.5 m,第 2 根注浆管比第 1 根注浆管短 3.0 m,第 3 根注浆管比第 2 根注浆管短 5.0 m,其中第 3 根注浆管作为封孔管。

布管完成后,用封孔管注浆,封孔过程中提动封孔管缓慢上升,直至浆液将钻孔灌满。封孔浆液凝固达到要求后,其余 2 根注浆管同时注浆,注浆压力控制在 1.0~1.5 MPa。

### 4.2 补桩

原加固方案中,补桩成孔方式采用冲击锤钻孔成孔,振动较大。在该特殊地质区域内,钻孔振动对墩身偏位有较大影响,所以在成孔过程中应该严

格控制振动频率或选用旋挖成孔工艺。

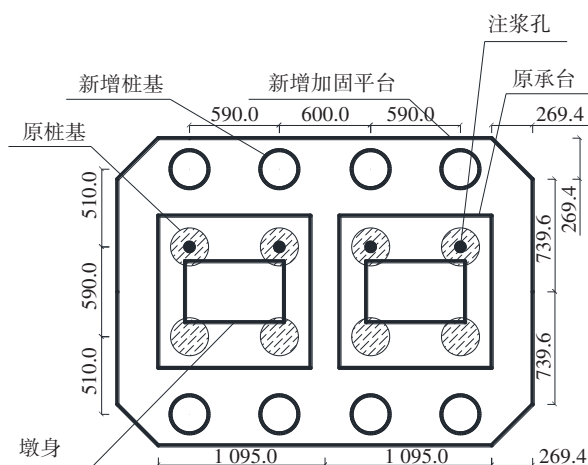


图13 注浆孔平面布置图(单位:cm)

Fig. 13 Floor plan of the grouting holes (unit:cm)

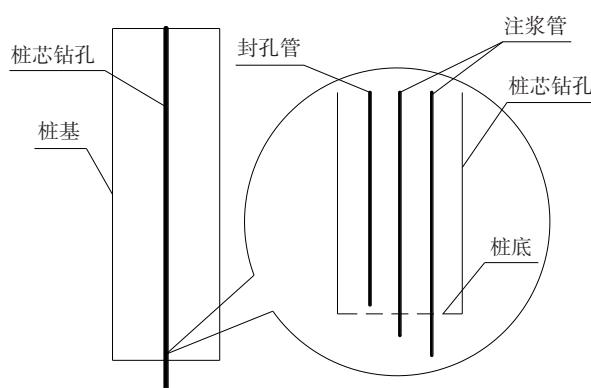


图14 注浆管布置图

Fig. 14 Layout drawing of grouting pipes

### 4.3 增大截面法纠偏墩身

根据《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)<sup>[16]</sup>、《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1—2017)<sup>[17]</sup>规定,新承台应将老承台包裹,新承台尺寸、位置应满足设计及规范要求。由于施工水位为159.0 m,偏位后桥墩原设计的8根桩基倾斜度无法测定,虽然按照现状倾斜程度分析,桩基偏位小于10 cm,倾斜度小于1%,可以满足规范要求,但墩身竖直度及轴线偏位均不满足规范要求,需进行纠偏改造。

桥墩墩身采用增大截面法进行纠偏,桥墩截面尺寸由原设计6.5 m×4.0 m增大至6.8 m×4.5 m。首先对墩身表面进行凿毛处理,然后进行植筋,接着进行新增墩身钢筋施工,最后浇筑混凝土。

## 5 结论

1) 墩身第一次偏位的原因:水对岩层的软化

作用以及破碎带的影响,使得桩侧摩阻力折减及桩底岩层承载能力降低,致使各桩基产生不均匀沉降,从而导致各墩身发生不同程度的偏位。墩身第二次偏位的原因:桩侧钻孔产生的应力释放、施工扰动及桩底破碎带加剧软化等多种因素耦合作用,加剧了6#墩各桩基的不均匀沉降,最终导致6#墩发生第二次较大偏位。

2) 各影响因素中,岩层软化对于墩身偏位的影响程度最大,桩底下卧破碎带引起墩身偏位14 mm,桩侧钻孔施工方式对墩身的偏位影响较小。

3) 原桩基5#~8#桩底采用预注浆加固方式可减小6#墩身在补桩过程中产生的80%偏位量,加固效果良好。

4) 该墩身合理的纠偏加固顺序应为:原桩基5#~8#桩底先注浆加固、再补桩、最后采用增大截面方式修正墩身。该优化加固方案可为类似工程提供良好借鉴。

## 参考文献(References):

- [1] 张玉,徐卫亚,王伟,等.破碎带软岩流变力学试验与参数辨识研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增刊2):3412-3420. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.004. ZHANG Yu, XU Weiya, WANG Wei, et al. Rheological test and parameter identification of soft rock in broken zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (sup 2): 3412-3420. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.s2.004.
- [2] 许成顺,豆鹏飞,杜修力,等.基于自由场大型振动台试验的饱和砂土固-液相变特征研究[J].岩土力学,2020,41(7):2189-2198. XU Chengshun, DOU Pengfei, DU Xiuli, et al. Study on solid-liquid phase variation characteristics of saturated sand based on free-field large-scale shaking table test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2189-2198.
- [3] 杨军,杨敏,罗如平.软土地基刚性桩复合地基动力离心模型试验[J].地下空间与工程学报,2019,15(2):381-386, 401. YANG Jun, YANG Min, LUO Ruping. Dynamic centrifuge model test of composite foundation with rigid pile in soft clay [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 381-386, 401.
- [4] 冯忠居,张聪,何静斌,等.强震作用下群桩基础抗液化性能的振动台试验[J].交通运输工程学报,2021,21(4):72-83. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.04.004. FENG Zhongju, ZHANG Cong, HE Jingbin, et al. Shaking table test of liquefaction resistance of group piles under strong earthquake [J]. Journal of Traffic and



- Transportation Engineering, 2021, 21(4): 72-83. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2021.04.004.
- [5] 崔杰, 张征, 唐亮, 等. 液化微倾场地群桩-土动力相互作用  $p$ - $y$  曲线特性[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(5): 154-164. DOI: 10.13197/j.cee.2021.05.154.cuij.015.
- CUI Jie, ZHANG Zheng, TANG Liang, et al.  $p$ - $y$  curve characteristics of pile group soil dynamic interaction in mildly inclined liquefiable ground [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(5): 154-164. DOI: 10.13197/j.cee.2021.05.154.cuij.015.
- [6] 李飞, 王贵君. 土力学与基础工程[M]. 2版. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2014.
- LI Fei, WANG Guijun. Soil mechanics and foundation engineering: refined edition [M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2014.
- [7] 黄平安. 钻(冲)孔桩桩边土的浆化及软化影响分析及工程对策研究[J]. 建筑技术开发, 2013, 40(9): 15-18.
- HUANG Ping'an. Influence of grouting and softening on pile edge soil of drilling (punching) hole and engineering countermeasures [J]. Building Technique Development, 2013, 40(9): 15-18.
- [8] 吴廷尧, 周传波, 蒋楠. 爆破振动作用下断层破碎带抗剪强度的劣化规律试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(6): 1457-1465. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2019.06.025.
- WU Tingyao, ZHOU Chuanbo, JIANG Nan. Experimental study on shear strength deterioration rules of fault fracture zone subjected to blasting vibration [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(6): 1457-1465.
- [9] 陈国平. 绢云母石英片岩特性与隧道围岩稳定性研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2008.
- CHEN Guoping. Study on the characteristics of sericite quartz schist and the stability of tunnel surrounding rock [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2008.
- [10] 郑广辉, 许金余, 王鹏, 等. 不同饱水度红砂岩静态本构关系及动态力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(16): 31-37. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.16.005.
- ZHENG Guanghui, XU Jinyu, WANG Peng, et al. Static constitutive relation and dynamic mechanical properties of red sandstone with different water saturation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(16): 31-37. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.16.005.
- [11] 林志强. 深厚强风化岩层冲孔灌注桩质量问题原因分析[J]. 工程勘察, 2019, 47(11): 23-28.
- LIN Zhiqiang. Analysis on the quality defect of bored pile in deep and thick highly decomposed rock [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2019, 47(11): 23-28.
- [12] 姜克寒, 刘邦, 秦坤元, 等. 断层破碎带中泥水盾构掘进参数优化研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 43-49. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.007.
- JIANG Kehan, LIU Bang, QIN Kunyuan, et al. Study on the optimization for mud-water shield driving parameters in fault fracture zone [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 43-49. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.007.
- [13] 周珂, 雷进生, 刘金鑫, 等. 基于非均质地层模型的注浆微型桩加固路基效果分析[J]. 中外公路, 2023, 43(6): 8-14. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.002.
- ZHOU Ke, LEI Jinsheng, LIU Jinxin, et al. Analysis of effect of grouting micro-pile strengthening subgrade based on heterogeneous layer model [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6): 8-14. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.002.
- [14] 宋克英, 张凯, 张启. 注浆加固处理液化地基试验研究[J]. 岩土工程技术, 2021, 35(3): 205-211. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2993.2021.03.013.
- SONG Keying, ZHANG Kai, ZHANG Qi. Grouting reinforcement treatment of liquefied foundation [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2021, 35(3): 205-211. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2993.2021.03.013.
- [15] 彭鹏, 张顶立, 孙振宇. 含软弱夹层隧道围岩变形特性与加固参数设计方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2260-2272. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0255.
- PENG Peng, ZHANG Dingli, SUN Zhenyu. Deformation characteristics of surrounding rock and reinforcement parameter design of weak interlayer tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(11): 2260-2272. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2021.0255.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵施工技术规范: JTG/T 3650—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specification for construction of highway bridges and culverts: JTG/T 3650—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程: JTG F80/1—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standards for quality inspection and verification of highways part 1 civil engineering works: JTG F80/1—2017 [S]. Beijing: China Communications Press, 2017.

(责任编辑: 欧碧峰; 英文编辑: 杜雪明)