

大型泵站流道钢衬受力分析及优化设计

张李萍¹, 彭常青², 韦诚涛³, 何志学⁴

(1.浙江省钱塘江流域中心, 浙江 杭州 310000; 2.浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002;

3.湖州市吴兴区排涝站, 浙江 湖州 313002; 4.浙江广川工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310020)

摘要: 泵站的流道决定着水泵进口的吸入条件, 对水泵装置效率、工程投资和安全运行影响较大, 为提高流道表面平整度, 降低水流流态对水泵装置效率的影响, 在设计大中型泵站流道时往往将进出水流道设计成永久钢衬。以某大型泵站流道钢衬为例, 叙述了流道钢衬设计中的荷载分析过程, 优化了钢衬面板、肋板、横撑及立杆等的设计方法, 并对主要构件的变形、内力、应力和稳定性等进行了验算, 对影响钢衬受力的有关敏感因子进行了分析, 可为类似工程的设计与施工提供参考。

关键词: 泵站流道; 钢衬; 受力分析; 设计优化

中图分类号: TV675

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0170-04

0 引言

水泵流道是水流进出水泵的通道, 一般由钢筋混凝土整体浇筑成型, 常与泵房的底板及侧墙浇筑在一起, 成为泵房的块基型基础。流道的形式和尺寸决定着水泵进口的吸入条件, 对水泵的装置效率、工程投资和安全运行影响较大^[1]。对于立式安装的泵组如轴流泵, 常采用肘型、钟型、簸箕型等流道; 对于水平安装的泵组如贯流泵, 常采用在水平和竖向方向均收缩的流线型流道。由于进水流道体型变化剧烈, 在采用常规木模板立模浇筑时, 往往因为模板加工精度和平整度不能满足设计要求, 进而影响进水流态并降低水泵装置效率, 因此在设计大中型泵站时, 对该部位常采用永久钢衬^[2]。

然而水泵的流道钢衬与水工压力隧洞、蜗壳等钢衬不同, 由于泵站流道内的水压力一般较小, 因而钢板的强度和厚度均较水工压力隧洞、蜗壳等钢衬要求低^[4-5]。其与一般的桥墩、闸墩钢模板也有差异^[6]: 一是流道钢衬为永久构件, 施工完毕后存留在流道内, 起到平顺水流和降低水力损失的作用, 因此需要考虑钢衬与混凝土的连接, 一般需设置内加劲肋, 并

在后期采取对空鼓部分灌浆等处理措施; 二是闸墩、桥墩等钢模板底部为敞开结构, 一般仅需考虑模板的侧向稳定即可, 而流道钢衬底部为封闭结构, 混凝土浇筑时浮力的影响不可忽略, 受力情况更加复杂。本文以某大型泵站的流道钢衬为例, 探讨泵站流道钢衬的受力分析及优化设计。

1 钢衬的荷载分析及控制标准

1.1 荷载分析

根据《水工混凝土施工规范》(SL 677—2014)^[7], 计算钢衬受力时需考虑的荷载主要如下。

(1) 钢衬面板及支撑自重: 对于钢模板、钢支架等构件, 按照各部分材料的体积与容重之积计算。

(2) 钢衬顶部混凝土及钢筋自重: 结合混凝土配合比及钢筋含量, 一般取 26~26.5 kN/m³。

(3) 施工人员及施工荷载: 取 2.5 kN/m²。

(4) 振捣荷载: 作用于水平面模板按 2.0 kN/m² 进行计算, 作用于侧压力有效高度范围内的垂直模板按 4.0 kN/m² 进行计算。

(5) 新浇筑混凝土对模板的侧压力: 按以下式(1)和式(2)中得到的更小值进行计算。

$$F = 0.22 \gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 v^{1/2} \quad (1)$$

$$F = \gamma_c H \quad (2)$$

式中: F 为新浇筑混凝土对模板的最大侧压力, kN/m²; γ_c 为混凝土的表观重度, kN/m³; t_0 为新浇筑混凝土的

收稿日期: 2023-09-05

作者简介: 张李萍(1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事工程建设与管理工作。

通信作者: 彭常青(1985—), 男, 学士, 高级工程师, 从事工程设计与管理工作。电子信箱: 416426035@qq.com

初凝时间, h , 可按 $t_0=200/(T+15)$ 进行估算 (T 为混凝土的浇筑温度, $^{\circ}C$); v 为混凝土的浇筑速度, m/h ; β_1 为受外加剂影响的修正系数, 不掺外加剂时取 1.0, 掺缓凝剂时取 1.2; β_2 为受坍落度影响的修正系数, 当坍落度小于 30 mm 时, 取 0.85, 当坍落度为 30~90 mm 时, 取 1.0, 当坍落度大于 90 mm 时取 1.15; H 为混凝土侧压力作用高度, m 。

(6) 浮托力: 浮托力对封闭式钢衬的稳定性影响较大, 在模板受浮面的水平投影面积内按 15 kN/m^2 进行估算。

(7) 卸料冲击荷载: 指混凝土浇筑过程中卸料对侧压力作用高度范围内的垂直模板产生的水平荷载标准值, 该值与卸料方法有关, 一般对采用导管法浇筑的混凝土取 2 kN/m^2 。

(8) 风荷载: 一般情况下由于混凝土浇筑产生的荷载与风荷载的遭遇概率较低, 因此在验算混凝土浇筑过程中的钢衬稳定性时可不考虑风荷载作用, 通常在抗倾覆稳定复核时才考虑风荷载的组合作用。

1.2 荷载组合

根据《水工混凝土施工规范》(SL 677—2014)^[7], 对模板自重、新浇筑混凝土自重、新混凝土对模板侧压力等相对确定的荷载分项系数取 1.2, 对施工人员及设备荷载、振捣荷载、卸料冲击荷载、浮托力等荷载分项系数取 1.4。

1.3 强度和刚度验算指标

(1) 对钢衬面板、加劲肋、横撑、立杆的允许应力不超过钢材的强度设计值, 对壁厚小于 16 mm 的 Q235 钢的抗压、抗弯设计值取 215 MPa。

(2) 对钢衬面板的挠度控制值取 $1/250$, 对加劲肋的挠度控制值取 $1/350$ 。

(3) 压杆的压缩变形值或弹性挠度值为相应结构的计算跨度的 $1/1\ 000$ 。

2 工程实例分析

2.1 工程概况

某平原地区大型排涝泵站工程, 设计总排涝流量为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$, 共设 3 台竖井贯流泵, 叶轮直径为 3 040 mm, 单泵设计流量为 $26.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 设计扬程为 1.62 m, 配套电机功率为 800 kW。水泵竖井段进水流道长约 14.8 m, 流道底板高程为 -4.7 m, 流道顶板顶面高程为 0.76 m, 侧墙混凝土高度为 5.46 m, 流道顶板混凝土厚度为 1.06 m, 流道过水断面由 $7.9 \text{ m} \times 4.4 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高) 的矩形渐缩至直径为 3.27 m 的圆形, 断面处

面积缩小率为 29.4%, 由于流道在水平和竖向方向均为非规则变化, 为确保流道施工质量, 设计对该渐变段采用永久钢衬。流道平面及三维图如图 1 和图 2 所示。

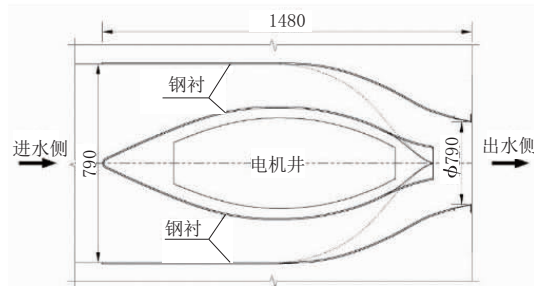


图 1 流道平面布置图(单位: cm)

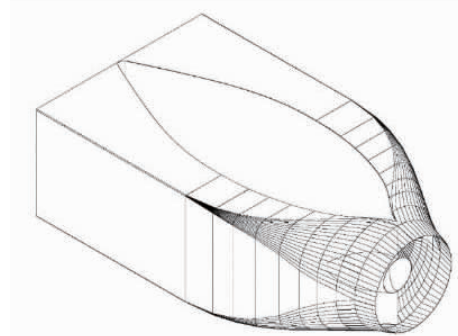


图 2 流道三维轴侧图

2.2 计算模型建立

本文选取进口段长约 6.9 m 的流道进行整体有限元分析。钢衬面板采用 8 mm 厚 Q235 钢板, 侧模水平方向加劲肋间距为 550 mm, 沿高度方向共布置 9 道, 竖直方向加劲肋间距为 600 mm, 沿水流方向共布置 13 道。顶板及底板在顺水流方向的加劲肋间距为 425 mm, 共布置 8 道; 垂直水流方向的加劲肋间距为 600 mm, 沿水流方向共布置 13 道。横撑沿高度方向共布置 3 道, 间距 1 100 mm, 顺水流方向排距 600 mm。立杆在垂直水流方向最大布置 2~4 排, 间距 850 mm, 顺水流方向排距 600 mm。流道采用三维有限元整体建模, 其中钢衬面板采用板单元, 加劲肋、横撑及立杆均采用梁单元, 如图 3 所示, 其主要荷载取值如表 1 所列。

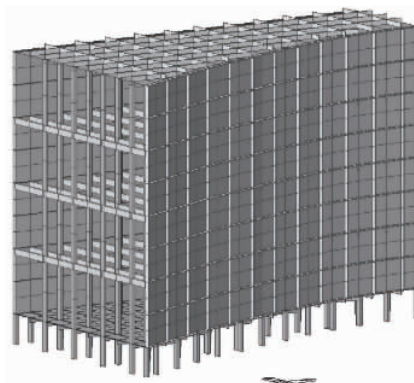


图 3 流道三维有限元模型

表 1 主要荷载取值表

序号	荷载类型	荷载取值	分项系数	作用部位
1	钢衬面板及支架自重	自动计算	1.2	构件自身
2	混凝土及钢筋自重	28.1 kN/m ²	1.2	顶面
3	施工人员及荷载	2.5 kN/m ²	1.4	顶面
4	振捣荷载	2.0 kN/m ²	1.4	顶面
		4.0 kN/m ²	1.4	侧面
5	新浇筑混凝土侧压力	25~58.9 kN/m ²	1.2	侧面
6	浮托力	15 kN/m ²	1.4	底面
7	卸料冲击荷载	2 kN/m ²	1.4	侧面

2.3 主要计算结果

经三维有限元计算,各构件挠度及受力结果如表 2 所列。

表 2 各构件计算结果汇总表

序号	部位	计算挠度	允许挠度	最大弯矩 / (kN·m)	最大 轴力 /kN
1	面板	1/344	1/250	189.5 MPa(应力)	—
2	加劲肋	1/367	1/350	5.9	—
3	撑杆	1/1 317	1/1 000	4.2	79
4	立杆	1/7 333	1/1 000	5.6	42.4

由计算结果分析可知,钢衬面板、加劲肋为受弯构件,横撑、立杆为压弯构件,其计算公式如下。

(1)受弯构件的应力计算^[3,8]

$$\frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq f \quad (3)$$

式中: M_x 、 M_y 为绕 x 轴、 y 轴的弯矩, $N\cdot mm$; W_x 、 W_y 为对 x 轴、 y 轴的净截面抵抗矩, mm^3 ; f 为允许的抗弯强度, MPa, 对 Q235 钢取 215 MPa。

(2)压弯构件的应力计算

$$\frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{W_x} \pm \frac{M_y}{W_y} \leq f \quad (4)$$

式中: N 为计算构建的轴心压力, N ; A 为计算构建的横截面积, mm^2 ; M_x 、 M_y 为绕 x 轴、 y 轴的弯矩, $N\cdot mm$; W_x 、 W_y 为对 x 轴、 y 轴的净截面抵抗矩, mm^3 ; f 为允许的抗弯强度, MPa, 对 Q235 钢取 215 MPa。

(3)压弯构件的稳定性计算

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{1x} (1 - 0.8 \frac{N}{N_{Ex}})} \leq f \quad (5)$$

式中: φ_x 为弯矩作用平面内轴心受压构件稳定系数; N 为计算构建的轴心压力, N ; A 为计算构建的横截面积, mm^2 ; γ_x 为截面塑性发展系数; β_{mx} 为等效弯矩系数, 按《钢结构设计标准》^[9] 第 8.2 节进行计算; M_x 为绕 x 轴、 y 轴的弯矩, $N\cdot mm$; W_{1x} 为弯矩作用平面

内对受压最大纤维的毛截面模量, mm^3 ; N_{Ex} 为欧拉临界力参数, 按《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[9] 中第 8.2 节的规定计算。

对各构件的计算结果如下。

(1)面板:最大变形值 17 mm,最大挠度为 $1/344 < 1/250$, 满足要求; 计算得最大应力为 $189.5 \text{ MPa} < 215 \text{ MPa}$, 满足要求。

(2)加劲肋:最大弯矩约 5.9 kN/m, 设计加劲肋厚 10 mm, 高度 140 mm, 计算得最大应力为 $180.6 \text{ MPa} < 215 \text{ MPa}$, 满足要求。

(3)横撑:最大轴力约 79 kN, 最大弯矩约 4.2 kN·m, 设计采用 10 号槽钢, 计算最大应力为 $167.8 \text{ MPa} < 215 \text{ MPa}$, 满足要求; 压杆稳定性计算为 165.2 MPa 小于 215 MPa, 满足要求。

(4)立杆:最大轴力约为 42.4 kN, 最大弯矩约为 5.6 kN·m, 设计采用 10 号槽钢, 计算得最大应力为 174.3 MPa 小于 205 MPa, 满足要求; 压杆稳定性计算为 $168.9 \text{ MPa} < 215 \text{ MPa}$, 满足要求。

3 对计算结果的讨论

3.1 关于侧压力的影响分析

由式 1 可知, 影响新浇筑混凝土侧压力的主要因素有:混凝土浇筑速度、混凝土入仓坍落度、外加剂及初凝时间等。对于具体工程而言, 混凝土浇筑速度和坍落度的影响是最主要的。结合本方案例, 当浇筑速度由 2 m/h 降低至 0.5 m/h、坍落度影响系数由 1.15 降低至 1.0、其余各参数维持不变时, 其侧压力计算结果如表 3 所列和图 4 所示, 各构件的受力对比情况如表 4 所列。

表 3 侧压力优化前后各参数对比表

计算参数	原设计	优化后
混凝土浇筑速度 $v / (m\cdot h^{-1})$	2.0	0.5
坍落度影响系数 β_2	1.15	1.00
外加剂影响系数 β_1	1.2	1.2
混凝土浇筑温度 $T / ^\circ C$	20	20
混凝土重度 $\gamma_c / (kN\cdot m^{-3})$	24	24
计算最大侧压力 $/(kN\cdot m^{-2})$	58.9	25.6
计算有效压头高度 h / m	2.45	1.07

由表 4 可知, 侧压力对钢衬的受力影响最大。本案例中侧压力优化前后的对比分析表明, 优化后钢衬面板的变形及弯矩、加劲肋的弯矩、横撑的弯矩及轴力、立杆的弯矩等主要构件受力减少幅度均接近 60%, 因

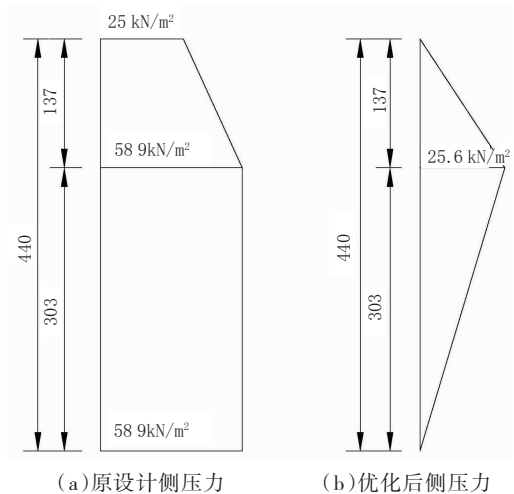


图 4 侧压力计算(单位:cm)

此设法降低浇筑过程中混凝土的侧压力,对工程的安全性和经济性意义重大,而采用较慢的浇筑速度和较小坍落度的混凝土往往能取得较好的效果。

表 4 侧压力优化前后各构件受力对比表

序号	部位	最大变形 /mm		最大弯矩 /(kN·m)		最大轴力 /kN	
		●	○	●	○	●	○
1	面板	16.2	6.6	2.42	1.10	—	—
2	加劲肋	—	—	5.9	2.3	—	—
3	撑杆	—	—	4.2(3.6)	1.3 (0.9)	65.2 (58.2)	25.8 (18.8)
4	立杆	—	—	4.5(4.0)	1.5 (1.0)	42.4 (17.0)	30.4 (5.3)

注:●表示优化前结果,○表示优化后结果,括号内的数值为侧压力的相应影响值。

另需说明的是,本案例内流道的支撑体系为型钢焊接结构,在模型计算时将立杆与对撑的连接部位按刚节点进行计算,因此侧压力的变化对立杆也有传力的作用,会导致立杆的弯矩、轴力均发生变化;而对于采用盘扣支架等支撑体系的情况,在立杆与撑杆节点处可按铰接处理,这样侧压力对立杆的影响将相应变小。

3.2 关于浮托力的影响分析

本案例分析计算表明,钢衬自重仅约 109 kN 时,混凝土浮托力达 256.5 kN,钢衬自重不足以抵抗混凝土浇筑过程中产生的浮托力,因此必须采取抗浮措施。在施工过程中常采用如下两种钢衬安装方案。

(1)钢衬在底板混凝土浇筑前安装。在流道底板底层的钢筋绑扎结束后,在垫层上设置支架同步安装钢衬,在对底板混凝土进行浇筑时完成钢衬底部以上 0.2~0.3 m 的混凝土浇筑。根据浮力原理,此时混凝土虽然已浇筑至钢衬底板以上,但浇筑顶面离钢衬底面高度较小,钢衬埋入混凝土内体积较小,因

此钢衬承受的浮托力也较小,此时可以利用钢衬的自重来抵抗混凝土浮托力,而在后期流道浇筑时可利用埋在底板混凝土内的支架及钢筋的拉力、钢衬底面与混凝土的粘结力来抗浮。该方案的优点是降低了混凝土浇筑过程中的浮托力,抗浮可靠性较高,抗浮措施得以简化,同时流道钢筋绑扎也较便利;缺点是当流道底板较厚时,设置支架的工程量较大,底板混凝土浇筑工期较长,基坑暴露时间长。

(2)钢衬在底板混凝土浇筑后安装。在进行流道底板浇筑时,在底板顶部预留 0.3~0.5 m 的钢衬安装空间,然后在浇筑完成的底板上安装钢衬、设置抗浮拉筋等,最后完成浇筑。该方案的优点是底板施工快,基坑暴露时间短,钢衬底部支架少;缺点是流道钢筋绑扎受钢衬安装影响,且由于钢衬底板底部的空间较小导致施工难度较大,钢衬所受浮托力较大,必须设大量拉筋来保证钢衬的抗浮稳定。

总之抗浮稳定是钢衬在设计 and 施工过程中必须考虑的重要问题,上述两种方案各有利弊,实际施工过程中可根据基坑开挖稳定性、劳动力配置、经济性等多方面综合考虑。

4 结 论

本文以某大型泵站流道钢衬为例,叙述了流道钢衬设计中的荷载分析过程,优化了对钢衬面板、肋板、横撑及立杆的设计等。通过建立整体的有限元模型,对主要构件的变形、内力、应力和稳定性等进行计算,再通过对有关敏感因子进行分析,得出主要如下结论。

(1)混凝土浇筑过程中的侧压力对钢衬稳定性的影响最大,合理降低混凝土的浇筑速度和入仓混凝土的坍落度对提高钢衬的稳定性或降低钢衬造价的效果较明显;

(2)浮托力是钢衬在设计过程中必须考虑的重要因素之一,实际施工时可根据现场实施条件,从安全性、经济性、紧迫性等多方面综合比选,灵活选择钢衬安装方案。

参考文献:

[1] 王福军.水泵与水泵站[M].北京:中国农业出版社,2005.
[2] 全国水利水电施工技术信息网组编.水利水电工程施工手册第 3 卷:混凝土工程[M].北京:中国电力出版社,2002.
[3] 李志良.中小型水电站模板工程[M].北京:中国电力出版社,2001.
[4] 陈敏,康建荣,罗刚.白鹤滩泄洪洞进水塔流道钢衬及支撑体系有限元分析[J].四川水利,2017(2):3-6.
[5] 蒋吉芳,罗平,张宇.乌东德水电站引水隧洞钢衬段混凝土施工技术

长上存在地层弹簧的作用,在桩基位移最大处上下存在两点正弯矩的最大点。伴随着右线隧道开挖穿越桩基础过程,D桩受到的最大正负弯矩均表现为增大的趋势,但在左侧隧道开始临近桩基础时,D桩沿X方向的位置逐渐减小,Y轴方向的弯矩也表现为减小。同时由上图也可以发现,盾构隧道在穿越桩基础时,桩单元受到的最大弯矩并非完全出现在施工完成后,也可能出现在施工过程中,因此关注施工中的应力荷载对结构安全来说也是十分重要的。

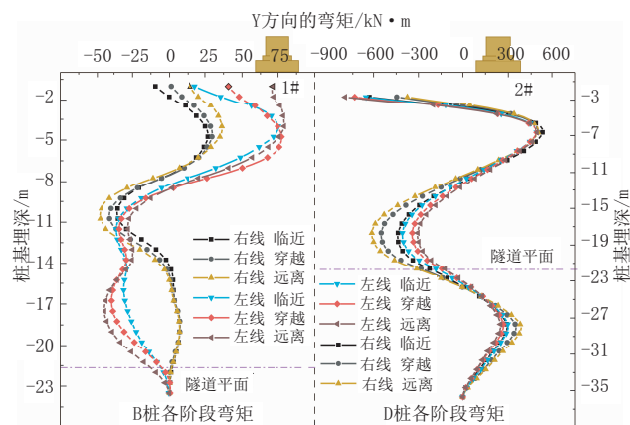


图7 B、D桩在不同开挖步下Y向弯矩变化

3.2.3 开挖面位移分析

图8是在双线隧道开挖过程中开挖面位移云图,在盾构隧道拱顶以上的土体表现为沉降运动,最大沉降量发生在拱顶位置,最大量级为7.4 mm;拱底位置则变现为隆起运动,最大的隆起量为1.78 cm。地表位置处形成由盾构隧道开挖引起的“W”形状的沉降槽,在盾构隧道穿越正上方沉降量最大,在中夹岩的正上方沉降量相比较小。

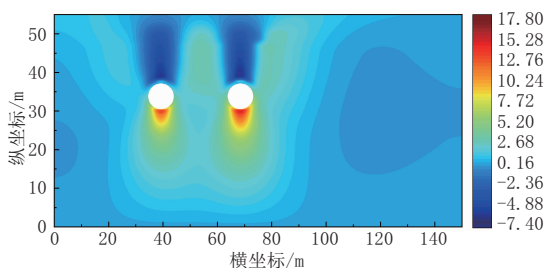


图8 开挖面位移云图(单位:mm)

4 结论

采用有限差分软件分析在盾构隧道穿越过程中桩基与地层的位移与应力变化,分析对既有运营铁路的影响,得出如下结论:

(1)盾构隧道穿越桥梁桩基时会引起桩基发生横向位移变化主要集中在盾构隧道所在深度;距离盾构隧道越近的桩基横向位移变化越大;位于双线盾构隧道两侧的桩基,随着左右线开挖过程桩基位移逐渐增大,而位于双线盾构隧道中间桩基,在开挖过程中横向位移先增大后减小。

(2)桩基在隧道开挖过程中产生较大的Y轴弯矩,位于双线隧道中间的桩基弯矩远大于位于双线隧道两侧的桩基弯矩;桩基在盾构隧道所在深度上产生较大的横向负弯矩,在隧道顶部以上或隧道底部以下因地层约束作用存在横向正弯矩;该工程中桩基最大负弯矩位于距离右行隧道最近的E桩,且处于盾构所在深度位置,在施工中应加强保护。

(3)双线隧道中间桩基随着左右线的开挖弯矩与位移表现先增大后减小的变化,在右线隧道远离桩基础时位移、弯矩最大,随着左线隧道的开挖逐渐减小,最大值约为开挖完成后应力应变的3~4倍,在开挖过程中应加强对桩基的监测与保护。

参考文献:

- [1] 吕文龙,王嘉豪.地铁盾构隧道开挖对邻近立交桥桩基影响分析[J].华南地震,2021,41(4):107-114.
- [2] 丰土根,况梦祥,沈正伟,等.双线盾构隧道侧穿既有桥桩影响分析及加固优化[J].河北工程大学学报(自然科学版),2021,38(3):55-62.
- [3] 郭现钊.地铁盾构隧道近距离下穿广深铁路影响分析及防护措施研究[J].铁道标准设计,2021,65(8):107-112,133.
- [4] 刘欣然,李兆平,张存,等.考虑地层蠕变特性的盾构隧道施工对邻近桥桩影响和保护措施[J].中国安全生产科学技术,2021,17(10):79-84.
- [5] 邱红胜,符传邦.盾构隧道施工对邻近斜桩的影响研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(5):925-929.
- [6] 李亚翠,杨新安,裴子钰,等.土岩复合地层盾构掘进对桥梁变形影响分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(2):533-542.
- [7] 吴锋波,郑卫强,齐剑峰,等.地铁双线盾构区间地表横向沉降槽参数分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(5):1653-1663.

(上接第173页)

- [J].人民黄河,2019,41(增刊2):239-241.
- [6] 曹梦云,肖永久,李丹等.基于有限元分析的桥墩钢模的结构优化分析[J].城市道桥与防洪,2023(4):115-118.

- [7] SL 677—2014,水工混凝土施工规范[S].
- [8] GB/T 706—2016,热轧型钢[S].
- [9] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].