

# 确保圆形隧道排水沟可按标准几何形位施工的调坡设计方法研究

刘 明 李驰宇 刘茹冰 杨 帆

(中铁二院华东勘察设计有限责任公司, 310004, 杭州)

**摘 要** [目的] 地铁圆形隧道铺轨前, 如果轨下净空较小将导致隧道内排水沟无法按标准几何形位施工。在区间缓坡段做顺坡处理容易导致积水, 而对道床结构及排水沟做特殊设计将使得水沟路径曲折, 同样容易导致排水不畅, 且对道床结构强度有一定影响。需开展调坡设计, 以确保圆形隧道排水沟可按标准几何形位施工。[方法] 基于内径 5 400 mm 的单洞单线圆形隧道及长枕式整体道床侧向排水沟, 分别对直线地段、实测隧道偏移方向与设计偏移方向一致的曲线地段、实测隧道偏移方向与设计偏移方向相反的曲线地段, 提出保证排水沟能按标准几何形位施工所需最小轨道下部净空的计算公式; 在轨上净空容许范围内进行优化调坡; 将调坡后轨下净空与确保排水沟能按标准几何形位施工所需最小轨下净空进行对比, 验证所提调坡设计方法的可靠性。[结果及结论] 工程实例验证结果表明: 优化调坡后, 轨道适当上抬, 轨下净空满足确保排水沟能按标准几何形位施工所需最小轨下净空要求, 排水沟可按标准几何形位施工, 排水沟底部坡度与轨面坡度一致, 排水通畅, 验证了所提调坡设计方法的可靠性。

**关键词** 地铁; 圆形隧道; 排水沟; 几何形位; 调坡

**中图分类号** U212.3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.04.006

## Research on Slope Adjustment Design Method Ensuring Standard Geometric Shape and Position Construction of Circular Tunnel Drainage Ditches

LIU Ming, LI Chiyu, LIU Rubing, YANG Fan

(CREEC East China Survey and Design Co., Ltd., 310004, Hangzhou, China)

**Abstract** [Objective] Prior to track laying in a circular subway tunnel, if the clearance under the tracks is insufficient, it will prevent drainage ditches from being constructed according to standard geometric shapes and positions. The smooth slope treatment in gentle interval slope section is prone to water accumulation, and special designs for the track bed structure and drainage ditches may result in tortuous ditch paths, which can also lead to poor drainage and have a certain impact on the

track bed structure strength. Therefore, a slope adjustment design is required to ensure that circular tunnel drainage ditches can be constructed according to the standard geometric shape and position. [Method] Based on a single hole single line circular tunnel with an inner diameter of 5 400 mm and a lateral drainage ditch of the long sleeper monolithic track bed, to ensure the drainage ditch being constructed according to the standard geometric shape and position, calculation formulas for the minimum track clearance required are proposed respectively for straight and curved sections, where the actual measured tunnel deviation direction is consistent with the designed offset deviation direction, and for curved sections where the actual measured tunnel deviation direction is opposite to the designed offset deviation direction; slope adjustment is optimized within the allowable range of the clearance on the track. To verify the reliability of the proposed slope adjustment design method, the clearance under the track after slope adjustment is compared with the minimum clearance under the track required to ensure that drainage ditches being constructed according to the standard geometric shape. [Result & Conclusion] Verification results of the engineering case show that after optimizing the slope adjustment, the track is properly raised, and the clearance under the track meets the minimum clearance required for drainage ditches construction according to the standard geometric shape and position. Thus, the drainage ditches can be constructed according to the standard geometric shape and position, with the slope of the drainage ditch bottom consistent with the slope of the track surface, and the drainage is smooth, which verifies the reliability of the proposed slope adjustment design method.

**Key words** subway; circular tunnel; drainage ditch; geometric shape and position; slope adjustment

## 0 引言

如果单洞单线长枕式整体道床设侧向排水沟<sup>[1]</sup>, 当曲线地段超高或实际盾构隧道与设计盾构

隧道存在偏移时,就会出现这种情况:虽然轨上净空能满足接触网安装要求、轨下净空能满足道床厚度要求<sup>[2]</sup>,但轨枕两侧与盾构管片之间的距离太短,侧向排水沟无法按标准几何形位施工,如图1所示。对于隧道内排水沟无法按标准几何形位施工的处理方法,国内学者提出做顺坡处理<sup>[3]</sup>、局部移动水沟平面位置<sup>[4]</sup>、将侧式水沟改为中心水沟<sup>[5]</sup>等方法。以上方法均是从施工方法或轨道结构设计角度来解决隧道内排水沟无法按标准几何形位施工的问题,且处理后仍然容易导致积水<sup>[6-7]</sup>,影响道床结构强度。本文提出基于满足圆形隧道排水沟按标准几何形位施工的要求,通过优化调坡,在轨上净空容许范围内,将轨道适当上抬,使得水沟均按标准几何形位施工,排水沟的底部平整,无凸起或凹陷,水沟底部坡度与轨面坡度一致,从而实现排水通畅。

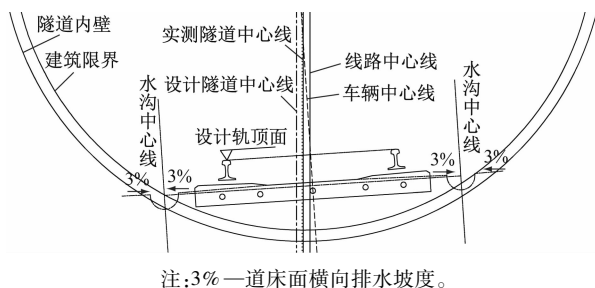


图1 侧向排水沟侵入隧道壁示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lateral drainage ditches intrusion into tunnel wall

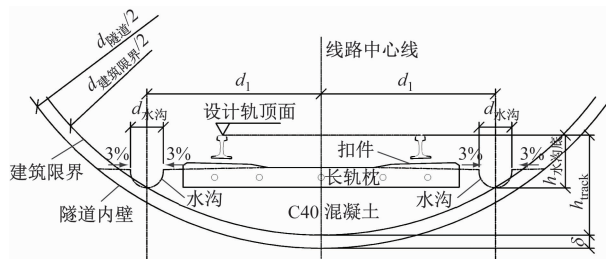
## 1 保证圆形隧道排水沟按标准几何形位施工的最小轨道下部净空确定

本文选取单洞单线圆形隧道作为研究对象,隧道内壁圆直径  $d_{\text{隧道}} = 5\,400\text{ mm}$ ,车辆为地铁B2型车,道床为长枕式普通整体道床,道床设侧向排水沟。根据《地铁限界标准》规定,普通道床地段的圆形隧道建筑限界直径最小应为  $5\,200\text{ mm}$ <sup>[8]</sup>,因此建筑限界圆直径取  $d_{\text{建筑限界}} = 5\,200\text{ mm}$ ,隧道内的轨道等结构横断面布置如图2所示。

当轨下净空不足时,为保证排水沟可按标准几何形位施工,轨道应至少上抬至排水沟紧贴隧道内壁,即排水沟的半圆与隧道内壁圆相切。

### 1.1 直线地段

直线地段排水沟紧贴隧道壁时,排水沟的半圆与隧道内壁圆相切,排水沟紧贴隧道壁断面,如图3

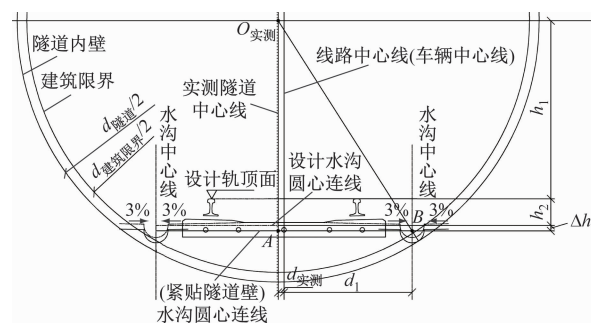


注:  $\delta$ —隧道内壁与建筑限界之间的间距(定义为建筑限界容许值),取  $100\text{ mm}$ ;  $d_{\text{水沟}}$ —排水沟直径,取  $250\text{ mm}$ ;  $d_1$ —排水沟圆心与线路中心线的距离,取  $1\,325\text{ mm}$ ;  $h_{\text{水沟底}}$ —排水沟底与设计轨顶面的距离,取  $400\text{ mm}$ ;  $h_{\text{track}}$ —轨道结构高度,取  $760\text{ mm}$ 。

图2 内径  $5\,400\text{ mm}$  圆形隧道长枕式道床断面图

Fig. 2 Cross section diagram of the long sleeper track bed in a  $5\,400\text{ mm}$  inner diameter circular tunnel

所示。



注:  $\Delta h$ —排水沟自设计位置至紧贴隧道壁位置沿车辆中心线方向的偏移量,亦为轨面沿车辆中心线方向的偏移量,可由直角三角形  $O_{\text{实测}}AB$  经勾股定理计算得出,单位  $\text{mm}$ ;  $h_1$ —实测隧道圆心与设计轨顶面的竖向距离,单位  $\text{mm}$ ;  $h_2$ —设计轨面与两侧排水沟圆心连线的竖向距离,单位  $\text{mm}$ ;  $d_{\text{实测}}$ —实测隧道中心线与线路中心线之间的偏移量,单位  $\text{mm}$ 。

图3 直线地段排水沟紧贴隧道壁断面图

Fig. 3 Cross section diagram of straight section with drainage ditches closely attached to tunnel wall

依据图3几何关系可知,线段  $O_{\text{实测}}A$ 、 $O_{\text{实测}}B$ 、 $AB$  为直角三角形的三条边,  $d_{O_{\text{实测}}B}$  为实测隧道与紧贴隧道壁排水沟圆心的距离,  $d_{O_{\text{实测}}A}$  为紧贴隧道壁排水沟圆心至实测隧道中心线的垂足与实测隧道圆心的距离,  $d_{AB}$  为紧贴隧道壁排水沟圆心与其至实测隧道中心线垂足的距离。

$$d_{O_{\text{实测}}B} = \frac{d_{\text{隧道}}}{2} - \frac{d_{\text{水沟}}}{2} \quad (1)$$

$$d_{O_{\text{实测}}A} = \Delta h + h_1 + h_2 \quad (2)$$

$$d_{AB} = d_{\text{实测}} + d_1 \quad (3)$$

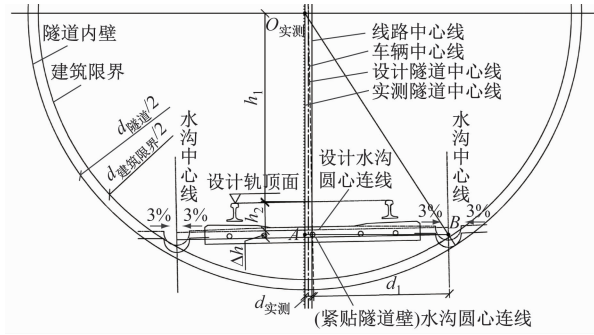
保证圆形隧道排水沟按标准几何形位施工所需最小轨道下部净空  $h_{\text{min}}$  为:

$$h_{\min} = h_{\text{track}} + \delta -$$

$$\sqrt{\left(\frac{d_{\text{隧道}}}{2} - \frac{d_{\text{水沟}}}{2}\right)^2 - (d_{\text{实测}} + d_1)^2} + h_1 + h_2 \quad (4)$$

## 1.2 曲线地段

曲线地段由于存在超高,车辆将向曲线内侧倾斜。曲线地段  $d_{O_{\text{实测}}B}$  的值与直线地段的相同,



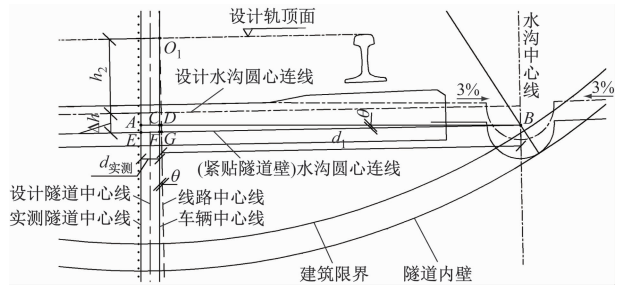
a) 半圆隧道断面图

$d_{O_{\text{实测}}A}$ 、 $d_{AB}$  需根据实测隧道偏移方向与设计隧道偏移方向是否一致及设计隧道中心线与线路中心线之间的偏移量  $d_{\text{设计}}$  与  $d_{\text{实测}}$  的比较关系分别计算。

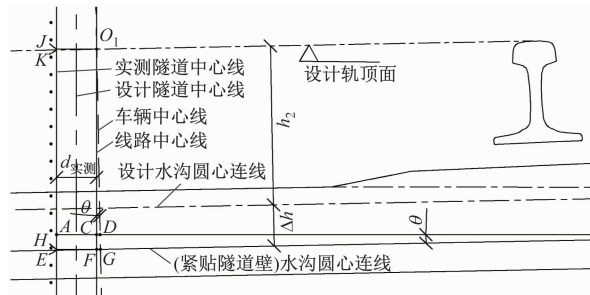
### 1.2.1 实测隧道偏移方向与设计偏移方向一致且

$d_{\text{实测}} > d_{\text{设计}}$  的曲线地段

排水沟紧贴隧道壁断面图如图 4 所示。



b) 横向详图



c) 竖向详图

注:  $\theta$ —车辆中心线与线路中心线的夹角, 亦为轨面(或排水沟圆心连线)与水平面所夹的锐角, 单位( $^{\circ}$ )。

图 4 曲线地段(实测隧道偏移方向与设计偏移方向一致, 且  $d_{\text{实测}} > d_{\text{设计}}$ )排水沟紧贴隧道壁断面图

Fig. 4 Cross section diagram of curved section (measured tunnel offset direction consistent with designed offset direction, and  $d_{\text{实测}} > d_{\text{设计}}$ ) with drainage ditches closely attached to the tunnel wall

保证圆形隧道排水沟按标准几何形位施工所需最小轨道下部净空为:

$$h_{\min} = h_{\text{track}} + \delta + \cos \theta (h_2 + d_{\text{实测}} \sin \theta + h_1 \cos \theta) - \cos \theta \sqrt{\left(\frac{d_{\text{隧道}}}{2} - \frac{d_{\text{水沟}}}{2}\right)^2 + (h_2 + d_{\text{实测}} \sin \theta + h_1 \cos \theta)^2 - (d_1 \cos \theta + d_{\text{实测}} + h_2 \sin \theta)^2 - (h_1 + h_2 \cos \theta - d_1 \sin \theta)^2} \quad (5)$$

### 1.2.2 实测隧道偏移方向与设计偏移方向一致且

$d_{\text{实测}} < d_{\text{设计}}$  的曲线地段

排水沟紧贴隧道壁断面图如图 5 所示。

保证圆形隧道排水沟按标准几何形位施工所需最小轨道下部净空为:

$$h_{\min} = h_{\text{track}} + \delta + \cos \theta (h_2 + h_1 \cos \theta + d_{\text{实测}} \sin \theta) - \cos \theta \sqrt{\left(\frac{d_{\text{隧道}}}{2} - \frac{d_{\text{水沟}}}{2}\right)^2 + (h_2 + h_1 \cos \theta + d_{\text{实测}} \sin \theta)^2 - (d_1 \cos \theta - d_{\text{实测}} - h_2 \sin \theta)^2 - (h_2 \cos \theta + h_1 + d_1 \sin \theta)^2} \quad (6)$$

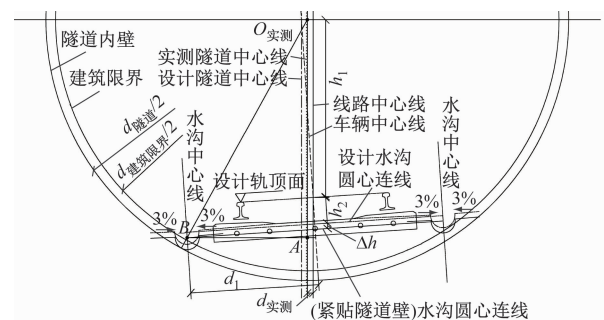
### 1.2.3 实测隧道偏移方向与设计偏移方向相反的

曲线地段

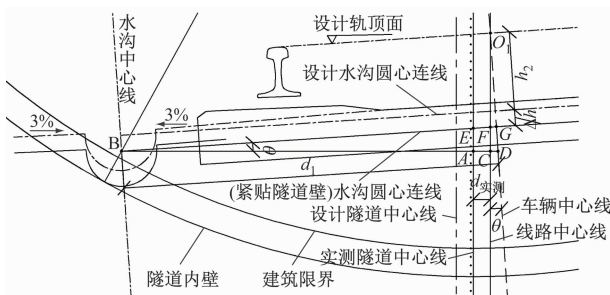
排水沟紧贴隧道壁断面图如图 6 所示。

保证圆形隧道排水沟按标准几何形位施工所需最小轨道下部净空为:

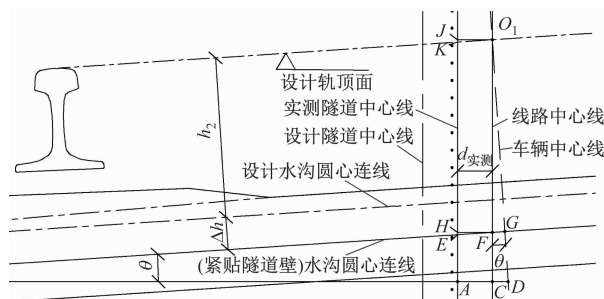
$$h_{\min} = h_{\text{track}} + \delta + \cos \theta (h_2 + h_1 \cos \theta - d_{\text{实测}} \sin \theta) - \cos \theta \sqrt{\left(\frac{d_{\text{隧道}}}{2} - \frac{d_{\text{水沟}}}{2}\right)^2 + (h_2 + h_1 \cos \theta - d_{\text{实测}} \sin \theta)^2 - (d_1 \cos \theta + d_{\text{实测}} - h_2 \sin \theta)^2 - (h_2 \cos \theta + h_1 + d_1 \sin \theta)^2} \quad (7)$$



a) 半圆隧道断面图



b) 横向详图



c) 竖向详图

图5 曲线地段(实测隧道偏移方向与设计偏移方向一致, 且  $d_{\text{实测}} < d_{\text{设计}}$ )排水沟紧贴隧道壁断面图

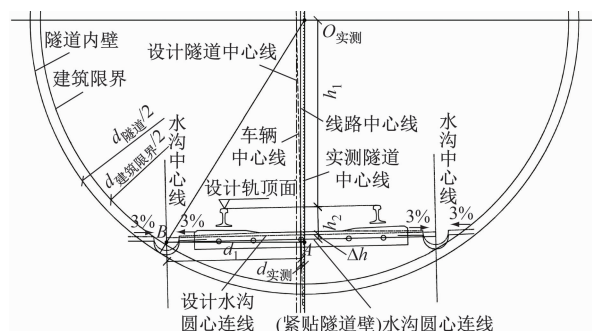
Fig.5 Cross section diagram of curved section (measured tunnel offset direction consistent with designed offset direction, and  $d_{\text{实测}} < d_{\text{设计}}$ ) with drainage ditches closely attached to the tunnel wall

## 2 竖向净空校核与调坡设计

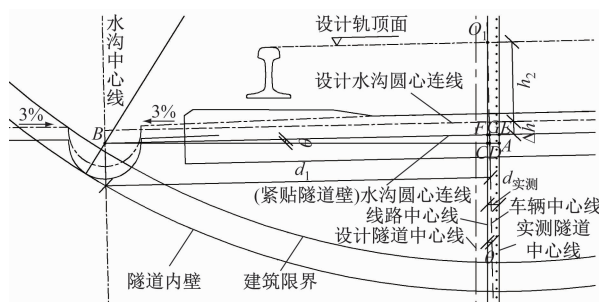
本文研究前提为默认横向净空满足限界要求。

竖向净空校核包括轨上净空检查和轨下净空检查。轨上净空检查需满足接触网专业要求;轨下净空检查除了需满足轨道结构高度要求外,还需满足圆形隧道排水沟按标准几何形位施工所需最小轨道下部净空要求。

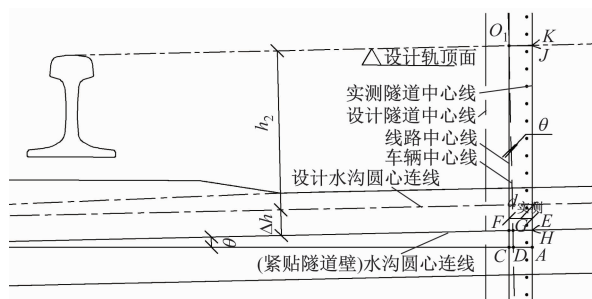
如果轨下净空不足,则需要调整纵断面。调坡方法主要有:移动变坡点位置、调整竖曲线半径大小、将一段整坡拆分成多段碎坡、在限界允许范围内增加竖曲线等<sup>[9]</sup>。



a) 半圆隧道断面图



b) 横向详图



c) 竖向详图

图6 曲线地段(实测隧道偏移方向与设计偏移方向相反)排水沟紧贴隧道壁断面图

Fig.6 Cross section diagram of curved section (measured tunnel offset direction opposite to designed offset direction) with drainage ditches closely attached to the tunnel wall

## 3 工程实例

某地铁区间右线采用内径 5 400 mm 的单洞单线圆形隧道,采用一般减振长枕式整体道床,轨道结构高度取 760 mm,道床设侧向排水沟。横向净空满足限界要求。根据上述公式分别计算直线地段、曲线地段排水沟按标准几何形位施工所需最小轨下净空。竖向净空校核情况如表 1 所示。由表 1 可知,竖向轨上净空均满足要求,3 个断面的轨下净空设计值与实测值的差值均大于 0.1 m,超过建筑限界容许值。表 1 中其他断面的轨下净空设计值与实



测值的差值虽未超过建筑限界容许值,能满足道床厚度要求,但轨下净空均不满足排水沟紧贴隧道壁所需轨下净空要求,需调坡。

表 1 调坡前竖向净空统计表  
Tab. 1 Statistical table of vertical clearance before slope adjustment

断面 里程/m	隧道偏移量/m		轨上净空/m			轨下净空/m			排水沟按标准几何形 位施工轨下净空/m	
	设计值	实测值	设计值	实测值	差值	设计值	实测值	差值	所需量	不足量
K35 + 418	0	-0.024	4.54	4.630	0.090	0.860	0.758	-0.102	0.782	-0.024
K35 + 431	0	-0.036	4.54	4.601	0.061	0.860	0.772	-0.088	0.789	-0.017
K35 + 440	0	-0.027	4.54	4.620	0.080	0.860	0.760	-0.100	0.783	-0.023
K35 + 449	0	-0.044	4.54	4.615	0.075	0.860	0.774	-0.086	0.794	-0.020
K35 + 458	0	-0.018	4.54	4.599	0.059	0.860	0.759	-0.101	0.778	-0.019
K35 + 494	0	0.027	4.54	4.620	0.080	0.860	0.773	-0.087	0.783	-0.010
K35 + 508	0	0.043	4.54	4.606	0.066	0.860	0.772	-0.088	0.793	-0.021
K35 + 557	-0.015	-0.042	4.54	4.624	0.084	0.860	0.762	-0.098	0.784	-0.022
K35 + 566	-0.012	-0.056	4.54	4.617	0.077	0.860	0.756	-0.104	0.795	-0.039
K35 + 575	-0.005	-0.067	4.54	4.592	0.052	0.860	0.791	-0.069	0.806	-0.015
K35 + 584	0	-0.049	4.54	4.578	0.038	0.860	0.793	-0.067	0.797	-0.004
K35 + 596	0	-0.033	4.54	4.587	0.047	0.860	0.775	-0.085	0.787	-0.012

注:本表仅取排水沟紧贴隧道壁所需轨下净空不满足要求的断面;隧道偏移设计值为 0 代表直线段,隧道偏移设计值不为 0 代表曲线段,-代表左偏,+代表右偏。

不满足排水沟按标准几何形位施工所需轨下净空要求的区段主要位于 K35 + 400—K35 + 600 地段,将 5.000‰的整坡、22.304‰的整坡均拆分为两段碎坡,并适当加大 K35 + 400—K35 + 600 段坡度,纵断面调整如图 7 所示。调坡后,竖向净空校核情况如表 2 所示。

由表 2 可知:2 个断面的轨上净空实测值小于设计值,最大差值为 0.011 m,满足接触网安装要求;所有断面的轨下净空设计值与实测值的差值均未超过建筑限界容许值,轨下净空均满足排水沟按标准几何形位施工所需轨下净空要求。

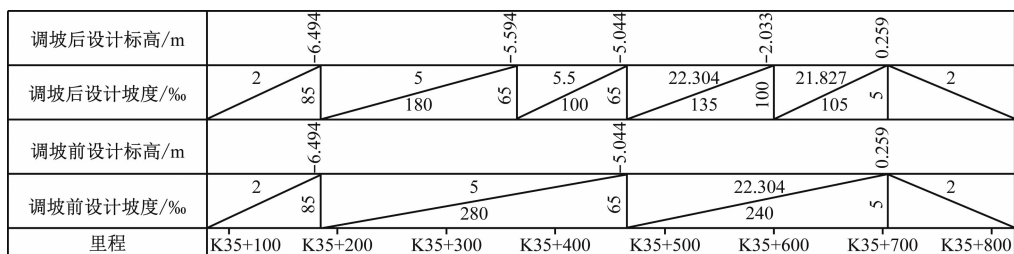


图 7 纵断面调坡示意图

Fig. 7 Schematic diagram of longitudinal section slope adjustment

#### 4 结语

本文基于圆形隧道长枕式整体道床侧向排水沟,对直线地段、实测隧道偏移方向与设计偏移方向一致( $d_{\text{实测}} > d_{\text{设计}}$ 、 $d_{\text{实测}} < d_{\text{设计}}$ )的曲线地段、实测隧道偏移方向与设计偏移方向相反的曲线地段分别提出排水沟按标准几何形位施工所需最小轨下

部净空的计算公式,以此作为竖向净空校核依据。通过优化调坡,在轨上净空容许范围内,将轨道适当上抬。调坡后排水沟可按标准几何形位施工,排水沟底部坡度与轨面坡度一致,实现了高效通畅排水。排水沟按标准几何形位施工所需最小轨道下部净空的计算公式与  $d_{\text{隧道}}$ 、 $d_{\text{水沟}}$ 、 $d_1$ 、 $h_1$ 、 $h_2$  等参数相关,调整对应参数数值,即可为类似项目在调坡设计层

表 2 调坡后竖向净空统计表  
Tab.2 Statistical table of vertical clearance after slope adjustment

断面 里程/m	隧道偏移量/m		轨上净空/m			轨下净空/m			排水沟按标准几何形 位施工轨下净空/m	
	设计值	实测值	设计值	实测值	差值	设计值	实测值	差值	所需量	不足量
K35 + 418	0	-0.024	4.54	4.604	0.064	0.860	0.784	-0.076	0.782	0.002
K35 + 431	0	-0.036	4.54	4.570	0.030	0.860	0.803	-0.057	0.789	0.013
K35 + 440	0	-0.027	4.54	4.587	0.047	0.860	0.793	-0.067	0.783	0.009
K35 + 449	0	-0.044	4.54	4.580	0.040	0.860	0.809	-0.051	0.794	0.015
K35 + 458	0	-0.018	4.54	4.562	0.022	0.860	0.796	-0.064	0.778	0.018
K35 + 494	0	0.027	4.54	4.574	0.034	0.860	0.819	-0.041	0.783	0.035
K35 + 508	0	0.043	4.54	4.557	0.017	0.860	0.821	-0.039	0.793	0.027
K35 + 557	-0.015	-0.042	4.54	4.575	0.035	0.860	0.811	-0.049	0.784	0.027
K35 + 566	-0.012	-0.056	4.54	4.568	0.028	0.860	0.805	-0.055	0.795	0.010
K35 + 575	-0.005	-0.067	4.54	4.544	0.004	0.860	0.840	-0.020	0.806	0.035
K35 + 584	0	-0.049	4.54	4.529	-0.011	0.860	0.842	-0.018	0.797	0.045
K35 + 596	0	-0.033	4.54	4.539	-0.001	0.860	0.824	-0.036	0.787	0.037

面解决区间道床排水沟无法按标准几何形位施工的问题提供借鉴和参考。

参考文献

[1] 欧阳全裕. 地铁轻轨线路设计[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 110.  
OUYANG Quanyu. Design of subway and light rail lines[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 110.

[2] 杜昊璇. 城市轨道交通施工完成后的调线调坡设计研究[J]. 地下工程与隧道, 2015(2): 52.  
DU Haoxuan. Design and study on adjustment of route plan and gradient of rail transit[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2015(2): 52.

[3] 李建斌. 圆形地铁隧道调线调坡设计研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(3): 90.  
LI Jianbin. Research on fine-tuning of line and slope of circular metro tunnel[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(3): 90.

[4] 司耀旺. 地铁线路调线调坡设计探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2016(3): 81.  
SI Yaowang. Discussion on design of metro track alignment and gradient rehabilitation[J]. Modern Urban Transit, 2016(3): 81.

[5] 吴世泽. 城市轨道交通调线调坡设计思考[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 247.  
WU Shize. Reflection on urban rail transit line and slope adjustment design[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 247.

[6] 陈菊. 城市轨道交通线路设计中的调线调坡技术研究[J]. 铁

道标准设计, 2014, 58(3): 25.  
CHEN Ju. Technical study on route alignment and gradient adjustment in route design of urban rail transit[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(3): 25.

[7] 赵磊. 轨道交通线路设计中的调线调坡技术探析[J]. 建筑与装饰, 2018(8): 41.  
ZHAO Lei. Analysis of line adjustment and slope adjustment techniques in rail transit line design[J]. Construction & Decoration, 2018(8): 41.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁限界标准: CJJ/T 96—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 21.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for metro gauges: CJJ/T 96—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 21.

[9] 李驰宇, 虞先溢. 轨道交通调线调坡技术及改进研究[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(4): 25.  
LI Chiyu, YU Xianyi. Technology and improvement of line and slope adjustment[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(4): 25.

• 收稿日期:2024-02-22 修回日期:2024-04-25 出版日期:2025-04-10  
Received:2024-02-22 Revised:2024-04-25 Published:2025-04-10

• 通信作者:刘明,工程师,956853033@qq.com

• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license