

地下水位升降对盾构隧道影响分析及其应对措施

曹伟

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘要: 文章以呼和浩特城市轨道交通1号线为研究对象,针对外部条件引起的地下水位升降变化,通过模拟计算和理论分析,研究水土共同作用下的地下水位升降与盾构隧道受力的关系,提出合理建议,提高了盾构隧道设计的结构安全与运营安全。研究结论表明:在不同埋深条件下,当地下水位位于拱顶以上时,管片配筋面积与地下水位埋深呈线性变化趋势,仅斜率存在差异;当地下水位位于拱顶以下与拱底之间时,呈抛物线变化趋势,抛物线开口大小、曲率等随着埋深的变化略有不同;当地下水位位于拱底以下时,呈水平直线趋势。在工程应用过程中,建议以拱腰作为计算基准水位,并对计算配筋面积适当放大,放大系数可取1.02。

关键词: 盾构隧道;地下水;理论分析;共同作用;砂性地层

中图分类号: P642;P641;U231;U45 **文献标识码:** A

ANALYSIS ON THE INFLUENCE OF GROUNDWATER LEVEL RISE AND FALL ON SHIELD TUNNEL AND ITS COUNTERMEASURES

CAO Wei

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Taking Hohhot Rail Transit Line 1 as the research object, aiming at the fluctuation of groundwater level caused by external conditions, through simulation calculation and theoretical analysis, this paper studies the relationship between the fluctuation of groundwater level under the combined action of water and soil and the stress of shield tunnel, puts forward reasonable suggestions, which improves the structural and operational safety of shield tunnel design. The research results show that under different burial depth conditions, when the groundwater level is above the vault, the reinforcement area of the segment and the burial depth of the groundwater level show a linear trend, and only the slope is different; When the groundwater level is below the arch crown and between the arch bottom, it shows a parabola change trend, and the parabola opening size and curvature change slightly with the burial depth; When the groundwater level is below the arch bottom, the trend is horizontal and straight. In the process of engineering application, it is recommended to take the arch waist as the calculation reference water level, and appropriately enlarge the calculated reinforcement area, with the magnification factor of 1.02.

Key words: shield tunnel; groundwater; theoretical analysis; interaction; sandy stratum

1 引言

砂性地层分布广泛,一直是国内外相关科研工作者和工程人员研究的重点,且研究成果非常丰富;然而以往的研究主要集中于盾构施工分析、管片内力理论计算以及试验模拟等。黄清飞^[1]等利用推导公式分析了不同覆土条件下水位变化对管片内力的影响,提出管片轴心齐平水位和实际最高水位为结构设计控制水位的结论,但其理论分析过程中并未考虑地下水水位变化因素及其对隧道周围土体约束条件的改变,对实际工程设计指导性不强。同时,随着国家水资源保护政策实施、自然气候变化以及新建工程等外部环境改变,引起周边地下水水位升降变化,将改变隧道结构原有的受力状态,如 2021 年 7 月份郑州暴雨事件、临近地块开发建设期间的基坑抽排水等等。因此,研究地下水水位升降对既有盾构隧道的影响十分必要。

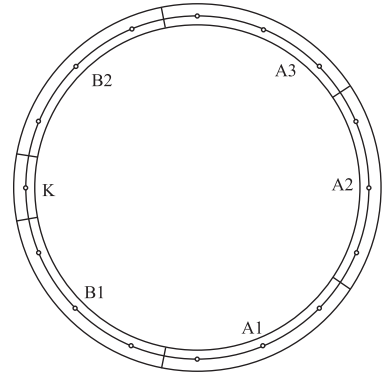
本文以呼和浩特城市轨道交通 1 号线为背景,通过分析地下水对地层物理参数的影响入手,分类选取不同条件下的合理参数,计算不同工况下的盾构隧道结构配筋面积,并借助于数据分析软件推导理论计算公式,利用高等数学分析手段,探寻砂性地层水土共同作用下的地下水水位升降对既有盾构隧道的影响。同时,以此为基础,拟定相应应对措施,为实际工程设计与应用提供参考与借鉴。

2 工程概况

呼和浩特轨道交通 1 号线是东西向的骨干线路,全长 21.719 km,其中盾构法区间隧道占 62.31%,覆土厚度 9.4~16.3 m。区间隧道位于山前冲洪积平原堆积区,以砂性地层为主,洞身范围地层主要有圆砾层、卵石层、砂层等;地下水呈西高东低趋势,潜水位埋深 4.60~25.10 m^[2]。综合分析行车及隧道内设备、施工误差、结构变形、隧道沉降等因素,隧道管片外径 $D=6\ 200\text{ mm}$,幅宽 1.5 m,环向采用 6 分块,如图 1 所示。

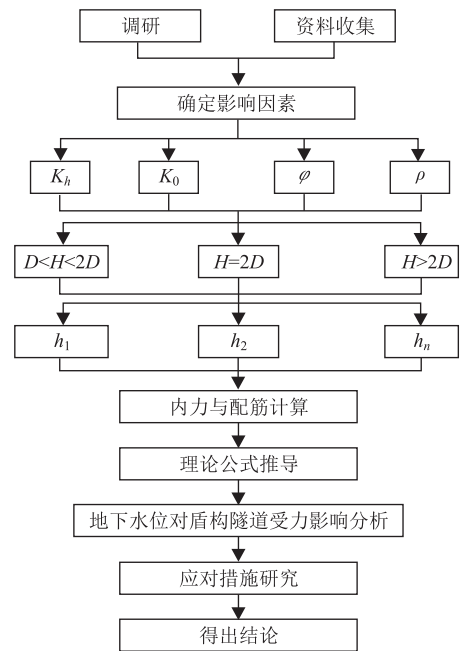
3 研究思路与技术路线

如图 2 所示,在查阅大量的文献资料、了解国内外研究成果的基础上,根据泰沙基理论公式和砂性地层特性,确定与其有关的关键地层参数;针对不同埋深、各种地下水水位选取对应的地层参数,计算盾构隧道配筋面积;借助 Origin^[3] 数据分析软件拟合特征曲线,推导分析地下水水位与配筋面积的相互关系,得出理论计算公式;利用数理统计分析手段,探



注:K 为封顶块;B1 为邻接块 1;B2 为邻接块 2;A1 为标准块 1;A2 为标准块 2;A3 为标准块 3

图 1 盾构隧道横断面图



注: H 为隧道埋深; D 为盾构隧道外径; h_1, h_2, h_n 为地下水水位; K_h 为水平基床系数; K_0 为静止侧压力系数; φ 为内摩擦角; ρ 为重度

图 2 研究技术路线

索各因素共同作用下盾构隧道的最不利水位;并结合工程应用分析,提出合理建议。

4 参数选取

地下水位的变化将直接影响地层含水量的变化,进而影响地层参数实际数值,如含水量越小水平基床系数越大^[4],砂性土的内摩擦角、静止土压力系数随着含水率的变化而变化^[5~6]等等。同时,文献^[7]运用正交试验原理和极差分析方法,充分考虑各地层物理力学参数相互作用,研究结论表明:影响管片内力的地层物理力学参数多因素敏感性等级由高到低分别为水平基床系数、静止侧压力系数、内摩擦

角、重度。因此,选取水平基床系数、静止侧压力系数、内摩擦角、重度等4个关键地层物理力学参数作为研究对象,并结合《详细勘察报告》^[2]试验数据取值(表1)进行计算分析。

表1 计算参数取值

序号	地层参数	单位	无水工况	饱和工况
1	重度 ρ	kN/m ³	2.06	1.99
2	水平基床系数 K_h	MPa/m	25.00	20.00
3	静止侧压力系数 K_0	—	0.42	0.43
4	内摩擦角 φ	°	32.00	31.00

5 模拟计算与分析

5.1 基本假设

根据砂性土层隧道水土分算的特点及本文研究的目的,对计算模型进行简化,建立“荷载-结构”模型,并借助于有限元软件进行分析。基本假设如下:

(1) 隧道洞身及上覆地层均为砂性地层,可对地层进行相应简化,即考虑自上而下为同一地层,且为理想弹性体,是连续的、均质的各向同性体。

(2) 简化隧道周边环境,不考虑建筑物、管线等外部环境因素影响。

(3) 隧道上方地表处于水平,不存在地层偏压。

(4) 隧道与周围土体密贴,且管片背后回填材料的力学参数不小于周围岩体的力学参数^[8]。

5.2 工况设计

为全面研究地下水位变化对盾构隧道的内力影响规律,结合泰沙基理论及相关规范之规定,并考虑本工程隧道埋深 H 与隧道外径 D 的关系,针对 $D < H < 2D$ 、 $H = 2D$ 和 $H > 2D$ 此3种埋深条件进行工况设计,即选取 $H = 10$ m、 $H = 12.4$ m、 $H = 15$ m 计算。同时,根据不同地下水位,设计计算工况如表2所示。其中,地下水位变化规律如下:

表2 工况设计

工况	地下水位 h /m			工况	地下水位 h /m		
	$H = 10$ m	$H = 12.4$ m	$H = 15$ m		$H = 10$ m	$H = 12.4$ m	$H = 15$ m
GK1	0.00	0.00	0.00	GK16	13.10	13.64	15.00
GK2	1.00	1.00	1.00	GK17	13.72	14.26	15.62
GK3	2.00	2.00	2.00	GK18	14.34	14.88	16.24
GK4	3.00	3.00	3.00	GK19	14.96	15.50	16.86
GK5	4.00	4.00	4.00	GK20	15.58	16.12	17.48
GK6	5.00	5.00	5.00	GK21	16.20	16.74	18.10
GK7	6.00	6.00	6.00	GK22	17.20	17.36	18.72
GK8	7.00	7.00	7.00	GK23	18.20	17.98	19.34
GK9	8.00	8.00	8.00	GK24	19.20	18.60	19.96
GK10	9.00	9.00	9.00	GK25	20.20	19.60	20.58
GK11	10.00	10.00	10.00	GK26	—	20.60	21.20
GK12	10.62	11.00	11.00	GK27	—	21.60	22.20
GK13	11.24	12.00	12.00	GK28	—	22.60	23.20
GK14	11.86	12.40	13.00	GK29	—	—	24.20
GK15	12.48	13.02	14.00	GK30	—	—	25.20

注:加粗字体为对应埋深条件下,地下水位位于拱腰处工况。

(1) 地下水位 h 位于拱顶以上时,自地面向下以1 m为间隔逐渐变化至拱顶。

(2) 地下水位 h 位于拱顶与拱底之间时,自拱顶向下以0.62 m为间隔逐渐变化至拱底。

(3) 地下水位 h 位于拱底以下时,不改变隧道周围土体的约束条件,也不改变隧道周围荷载,即对结构受力没有影响。故仅考虑自拱底向下以1 m为间隔逐渐变化4次。

5.3 模拟计算

通过仅受压弹簧模拟衬砌环与周围土体的相互作用^[9],采用修正惯用法^[10~11]进行模拟计算。因篇幅限制,仅提取 $H = 15$ m 条件下主要工况的内力计算云图,如表3所示;各工况内力计算结果如表4所

示。同时,根据文献^[12]研究结论,提取最大弯矩与最小轴力,按偏心受压构件计算结构配筋,结果如表5所示。不同埋深条件下,隧道配筋面积与地下水位关系如图3~5所示。

5.4 计算结果分析

对比分析3种埋深条件各种工况计算结果发现:以拱顶、拱底作为地下水位分界点,将隧道配筋面积分为拱顶以上、拱顶与拱底之间、拱底以下3个区段,且均具有较明显的变化趋势。当地下水位位于拱顶以上时,随着地下水位降低,弯矩增大、轴力减小,偏心距增大;从变化趋势来看,在不同埋深条件下,隧道配筋面积与地下水位近似呈线性变化趋势,仅斜率存在差异。当地下水位位于拱顶与拱底

表 3 主要工况隧道内力计算云图($H=15\text{ m}$)

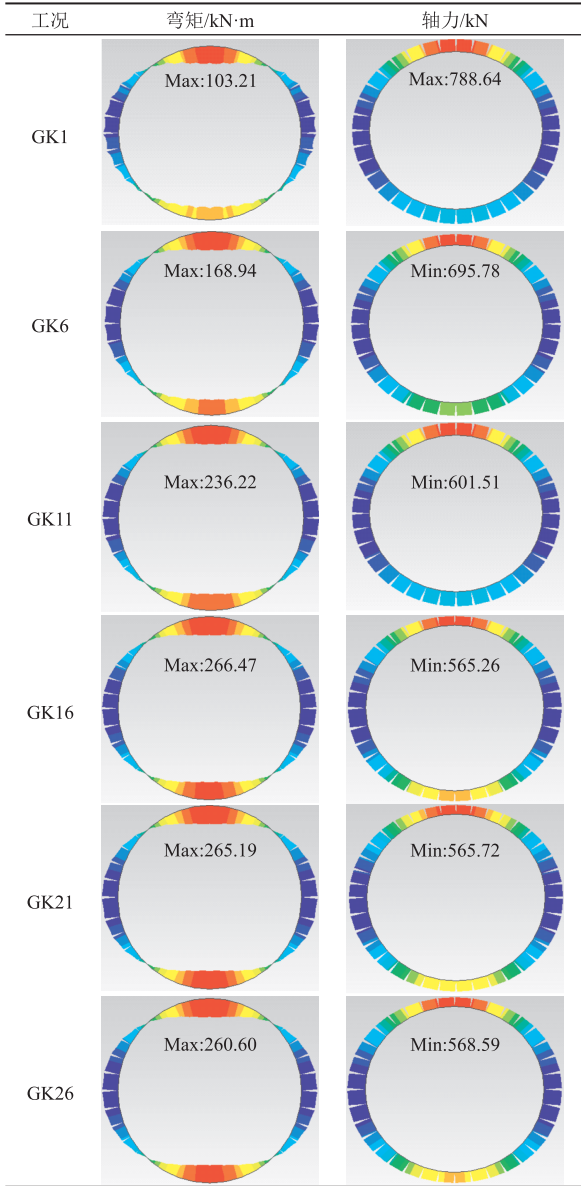


表 4 隧道各种工况下内力分析结果($H=15\text{ m}$)

工况	弯矩/kN·m	轴力/kN	偏心距/m
GK1	103.21	788.64	0.131
GK2	116.21	770.15	0.151
GK3	129.24	751.62	0.172
GK4	142.30	733.05	0.194
GK5	155.61	714.44	0.218
GK6	168.94	695.78	0.243
GK7	182.32	677.05	0.269
GK8	195.55	658.61	0.297
GK9	209.18	639.42	0.327
GK10	222.67	620.51	0.359
GK11	236.22	601.51	0.393
GK12	249.80	582.45	0.429
GK13	263.43	563.32	0.468
GK14	275.48	547.47	0.503
GK15	279.24	546.94	0.511
GK16	266.47	565.26	0.471
GK17	268.50	562.94	0.477
GK18	279.56	546.65	0.511
GK19	277.00	553.99	0.500
GK20	269.41	562.58	0.479
GK21	265.19	565.72	0.469
GK22	262.29	567.72	0.462
GK23	260.73	568.58	0.459
GK24	259.42	569.54	0.455
GK25	263.77	566.76	0.465
GK26	260.60	568.59	0.458
GK27	260.60	568.59	0.458
GK28	260.60	568.59	0.458
GK29	260.60	568.59	0.458
GK30	260.60	568.59	0.458

注:加粗字体为地下水位于隧道洞身范围的内力分析结果。

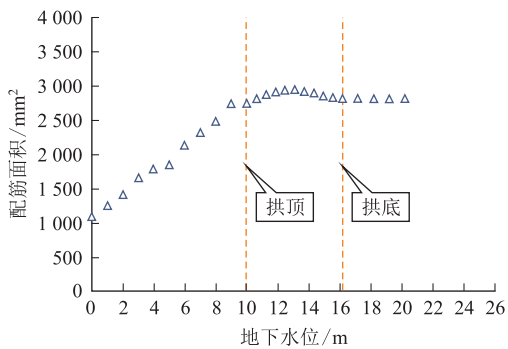


图 3 配筋面积与地下水位关系图($H=10\text{ m}$)

之间时,随着地下水位降低,弯矩先增大后减小,轴力则先减小后增大,偏心距先增大后减小;从变化趋势来看,在不同埋深条件下,隧道配筋面积与地下水位近似呈抛物线变化趋势,仅抛物线开口大小、曲率

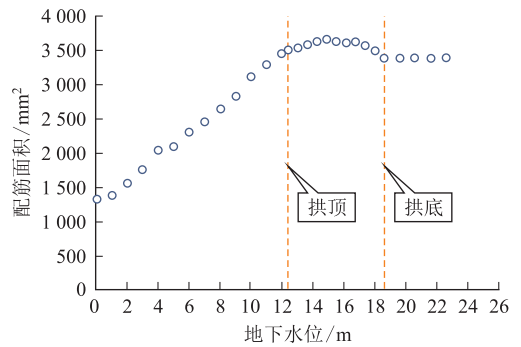


图 4 配筋面积与地下水位关系图($H=12.4\text{ m}$)

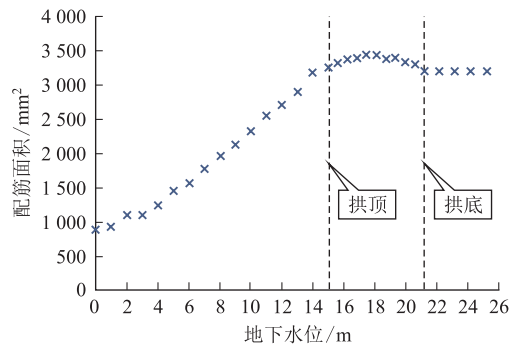


图 5 配筋面积与地下水位关系图($H=15\text{ m}$)

表5 隧道各种工况下配筋计算结果

工况	配筋面积/mm ²			工况	配筋面积/mm ²		
	H=10 m	H=12.4 m	H=15 m		H=10 m	H=12.4 m	H=15 m
GK1	1 079	1 313	857	GK16	2 902	3 581	3 251
GK2	1 253	1 381	918	GK17	2 913	3 624	3 317
GK3	1 415	1 550	1 080	GK18	2 896	3 657	3 370
GK4	1 660	1 744	1 092	GK19	2 856	3 620	3 390
GK5	1 780	2 028	1 233	GK20	2 825	3 603	3 431
GK6	1 849	2 097	1 432	GK21	2 805	3 626	3 381
GK7	2 131	2 299	1 558	GK22	2 805	3 565	3 377
GK8	2 312	2 450	1 757	GK23	2 805	3 493	3 387
GK9	2 479	2 642	1 941	GK24	2 805	3 388	3 323
GK10	2 742	2 823	2 124	GK25	2 805	3 388	3 296
GK11	2 739	3 107	2 320	GK26	—	3 388	3 192
GK12	2 805	3 283	2 542	GK27	—	3 388	3 192
GK13	2 866	3 453	2 696	GK28	—	3 388	3 192
GK14	2 901	3 498	2 897	GK29	—	—	3 192
GK15	2 908	3 528	3 171	GK30	—	—	3 192

注:加粗字体为对应埋深条件下,地下水水位位于拱腰处的计算配筋结果。

等略有不同。当地下水位位于拱底以下时,隧道承受的水压力无变化、且洞身及以上的地层参数亦无变化,故配筋面积与地下水水位无关,呈水平直线趋势。

6 应对措施研究

6.1 理论公式推导

为分析配筋面积与地下水位的关系,将配筋面积 A_s 作为因变量,地下水水位 h 作为自变量,并结合 4.3 节分析结论,拟定关系表达式如下:

$$A_s = \begin{cases} bh + c & \text{①} \\ ah^2 + bh + c & \text{②} \\ c & \text{③} \end{cases} \quad (1)$$

其中, A_s 为配筋面积(mm²); h 为地下水水位埋深(m); a 、 b 、 c 为常数。

①、②、③分式分别表示水位位于拱顶以上、位于拱顶、拱底之间以及位于拱底以下时,配筋面积与地下水位的函数关系。

对公式(1)进行求导,得:

$$A_s' = \begin{cases} b \\ 2ah + b \\ 0 \end{cases} \quad (2)$$

当地下水位位于拱顶以上、拱底以下时,不存在极点;只有当地下水位位于拱顶、拱底之间时,存在极点;即最不利地下水水位将位于拱顶与拱底之间。故仅选取地下水水位位于拱顶、拱底之间的计算数据,通过 Origin 数据分析软件拟合特征曲线,得出理论

计算公式如表 6 所示。相关系数^[13~15]均接近 1,表明:当地下水位位于拱顶与拱底之间时,隧道结构配件面积 A_s 与地下水水位埋深 h 相关性密切。

表6 不同埋深配筋面积与最不利地下水水位关系表

埋深/m	函数拟合	相关系数
H=10	$A_s = -15.50 h^2 + 411.67 h + 184$	0.948 5
H=12.4	$A_s = -20.53 h^2 + 624.77 h - 1 111$	0.928 1
H=15	$A_s = -19.32 h^2 + 691.10 h - 2 763$	0.954 2

6.2 理论分析

通过 4.3 分析结论表明:盾构隧道埋深对本文计算过程与结论影响不大,故取 $H=15$ m 进行最不利水位研究。将表 4 拟合函数,代入公式(2)得:

$$A_s' = -2 \times 19.32 \times h + 691.10 \quad (3)$$

令 $A_s' = 0$, 则:

$$h = 17.886 \quad (4)$$

即 $H=15$ m 时,最不利水位为 17.886 m,并非管片轴心齐平水位(拱腰)和实际最高水位。将最不利水位代入表 6 相应公式,得到最不利水位对应的隧道配筋面积为 3 417.373 mm²。同时,说明地下水升降改变了地层物理力学参数,进而引起最不利水位动变化。因此,在工程应用中应重点关注水土共同作用。

6.3 应对措施

表7 配筋面积对比表

埋深/m	地下水水位/m		配筋面积/mm ²	
	拱腰水位	最不利水位	$A_{S(\text{拱腰})}$	$A_{S(\text{max})}$
H=15	18.10	17.886	3 381	3 417.373

基于表 7 数据,将理论最不利水位对应的配筋面积 $A_{S(\text{max})}$ 与水位位于拱腰位置时配筋 $A_{S(\text{拱腰})}$ 进

行对比分析,相互关系如公式(5)。

$$A'_{S(\max)} = 1.011A_{S(\text{拱腰})} \quad (5)$$

即理论最不利水位配筋面积略大于拱腰水位配筋面积,约为1.011倍。

从工程实际角度出发,并考虑工程设计的可操作性及可靠性,建议在盾构隧道设计过程中,以拱腰作为计算基准水位,并对计算配筋面积适当放大,放大系数可取1.02,以应对地下水位升降对盾构隧道的结构安全及运营安全的影响。

7 结论

以呼和浩特城市轨道交通盾构隧道穿越的典型砂性地层为背景,通过对不同地下水位埋深情况下隧道结构配筋面积进行数理统计分析,分析水土共同作用下盾构隧道受力与地下水位的关系,探寻地下水位升降对盾构隧道的影响,主要得到以下结论:

(1) 拱顶、拱底作为地下水位分界点,将隧道配筋面积分为拱顶以上、拱顶与拱底之间、拱底以下3个区段,且均具有较明显的变化趋势。

(2) 当地下水位位于拱顶以上时,管片配筋面积与地下水位埋深呈线性变化趋势,但是对于不同埋深,其斜率存在差异。

(3) 当地下水位位于拱顶以下与拱底之间时,呈抛物线变化趋势,抛物线开口大小、曲率等随着埋深的变化略有不同。

(4) 在工程应用过程中,建议以拱腰作为计算基准水位,并对计算配筋面积适当放大,放大系数可取1.02。

参考文献

- [1] 黄清飞,袁大军,王梦恕.水位对盾构隧道管片结构内力影响研究[J].岩土工程学报,2008,30(8):1112-1120.
- [2] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司.呼和浩特市轨道交通1号线一期工程孔家营站~呼钢东路站区间详细勘察报告[R].2015:12.
- [3] 张习博.基于Origin软件的化工原理实验曲线拟合方法与应用[J].粘接,2019,40(9):122-126.
- [4] 陈广峰,梁雅强.水平基床系数影响因素的探讨[J].兰州理工大学学报,2005,31(2):116-119.
- [5] 简鹏,路军富,钟英哲.基于不同密度与含水率下的砂卵石强度参数研究[J].科学技术与工程,2016,16(24):257-261.
- [6] 强跃,赵明阶,林军志,等.静止土压力系数探究[J].岩土力学,2013,34(3):727-730.
- [7] 曹伟,王俊,李慧.砂卵石地层中影响盾构管片内力的多因素敏感性分析[J].中国安全生产科学技术,2019,15(S1):125-129.
- [8] 曹伟,王立新.地层膨胀力对盾构管片结构受力影响分析[J].铁道标准设计,2014,58(3):94-96,145.
- [9] 曹伟.砂卵石地层物理力学特性对盾构隧道管片内力的影响[J].铁道建筑,2020,60(8):73-76.
- [10] 曾东洋,何川.盾构隧道衬砌结构内力计算方法的对比分析研究[J].地下空间与工程学报,2005,1(5):707-712.
- [11] 李雪,张玉申,耿翔鹏,等.大直径越江盾构隧道结构受力现场实测分析[J].地下空间与工程学报,2022,18(1):297-304.
- [12] 李守巨,于申,刘军豪.轴力对混凝土管片极限承载力影响的计算模型[J].煤炭学报,2017,42(1):236-241.
- [13] 陈雨露,赵子维,郭东军,等.城市地下空间与人口分布的相关性研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(3):637-648.
- [14] 杨虎,钟波,刘琼荪,等.应用数理统计[M].北京:清华大学出版社,2006:92-99.
- [15] 陈战旗,解道举,邹莉清,等.物理力学性质对尾矿坝稳定性影响研究[J].地质灾害与环境保护,2023,34(2):78-85.

作者简介: 曹伟(1984—),男,四川万源人,本科,高级工程师,工作单位:中铁第一勘察设计院集团有限公司,主要从事地下结构工程的设计及科研工作。E-mail:270902962@qq.com