

预弯钢-混组合跨座式单轨轨道梁力学性能分析及截面优化^{*}

刘媛媛¹ 申彦利^{1,2,3} 杜 鹏^{1,2,3}

(1. 河北工程大学土木工程学院, 056038, 邯郸; 2. 河北省装配式结构工程技术创新中心, 056038, 邯郸;

3. 河北工程大学新型单轨交通体系工程研究中心, 056038, 邯郸)

摘 要 [目的] 传统跨座式单轨轨道梁大多采用宽为 850 mm 的截面形式, 针对我国三四线城市的城市轨道交通建设要求, 相关企业提出了宽为 1 250 mm 的跨座式单轨列车截面形式。为解决新型跨座式单轨列车的特殊需求, 有必要对其轨道梁的力学性能和截面形式进行研究。[方法] 采用数值模拟方法, 建立了预弯钢-混组合轨道梁模型; 基于传统轨道梁截面形式, 提出宽为 1 250 mm 的预弯钢-混组合跨座式单轨轨道梁初步截面形式; 分析不同荷载组合情况下的截面力学性能, 并以用钢量最省为目标, 对初步截面形式进行截面参数优化。[结果及结论] 随着钢箱梁顶板厚度增加、钢箱梁上翼缘最大正应力呈减小的趋势; 随着钢箱梁底板厚度的增加, 钢箱梁下翼缘最大正应力值呈减小的趋势; 随着腹板厚度的增加, 钢箱梁腹板最大剪应力值呈减小的趋势。在最不利荷载工况组合下, 所提轨道梁初步截面形式的刚度与强度均满足规范容许限值; 优化后的顶板厚度、腹板厚度、底板厚度分别为 16 mm、20 mm、16 mm, 钢材表面积可节省约 29.89%。

关键词 跨座式单轨; 预弯钢-混组合轨道梁; 力学性能

中图分类号 U232

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.02.018

Mechanical Performance Analysis and Profile Optimization of Pre-bent Steel-concrete Composite Straddle Monorail Track Beams

LIU Yuanyuan¹, SHEN Yanli^{1,2,3}, DU Peng^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, 056038, Handan, China; 2. Hebei Province Prefabricated Structure Engineering Technology Creation Center, 056038, Handan, China; 3. Engineering Research Center of New Monorail System, Hebei University of Engineering, 056038, Handan, China)

Abstract [Objective] Most conventional straddle monorail track beams utilize a profile form with 850 mm width. In response to the urban rail transit construction demands of the

third and fourth-tier cities in China, relevant enterprises propose a profile form with 1 250 mm width for straddle monorail train. To address the special requirements of the new straddle monorail train, it is necessary to study the mechanical performance and profile form of the track beams. [Method] A numerical simulation method is employed to establish a pre-bent steel-concrete composite track beam model. Based on the conventional track beam profile form, a preliminary profile form of 1 250 mm wide pre-bent steel-concrete composite straddle monorail track beam is proposed. The mechanical performance of the profile under different load combinations is analyzed, and the profile parameters of the preliminary profile form are optimized with the goal of minimizing steel consumption. [Result & Conclusion] With the increase of steel box beam top plate thickness, the maximum normal stress of steel box beam upper flange decreases. When the steel box beam bottom plate thickness increases, the maximum normal stress of steel box beam lower flange decreases. With the increase of auxiliary plate thickness, the maximum shear stress of steel box beam auxiliary plate decreases. Under the most unfavorable load working condition combinations, the stiffness and strength of the proposed track beam preliminary profile form both meet the allowable limit of the specifications. The optimized top plate thickness, auxiliary plate thickness, and bottom plate thickness are 16 mm, 20 mm and 16 mm, respectively, contributing to approximately 29.89% reduction in steel surface area.

Key words straddle monorail; pre-bent steel-concrete composite track beam; mechanical performance

在跨座式单轨交通系统中, 轨道梁具有承重和车辆导向的作用, 其对跨座式单轨交通能否正常运行具有重要的作用。对于跨度约为 20 m 的跨座式单轨轨道梁, 目前一般采用预应力混凝土轨道梁, 轨道梁截面尺寸为 850 mm(宽) × 1 500 mm(高)。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51378169); 河北省教育厅科学研究项目资助项目(QN2021031)

对于大跨度轨道梁,一般采用简支梁或连续钢箱梁。当钢材裸露在大气环境下时,易产生腐蚀现象。由于钢轨道梁运营期间的维护成本高、维修不易、调试困难等特点,研究人员结合钢材与混凝土的优点,提出了一种钢筋-混凝土(以下简称“钢-混”)组合轨道梁。文献[1]提出一种新型预应力钢-混组合轨道梁截面形式,轨道梁截面尺寸为 850 mm(宽)×1 500 mm(高),对轨道梁正常使用时的极限状态和承载力极限状态进行了理论验算,同时基于 ANSYS 软件进行建模计算,确定了新型预应力钢-混组合轨道梁截面布置的合理性。

目前,传统的跨座式单轨轨道梁顶面截面宽度一般为 850 mm,相关企业针对我国三四线城市的城市轨道交通建设要求,提出一种宽度为 1 250 mm 的跨座式单轨列车截面形式。对于这种截面形式的列车,传统的轨道梁截面形式已不再适用。基于此,为解决新型跨座式单轨列车的特殊需求,本文基于传统截面形式,提出一种宽度为 1 250 mm 的预弯钢-混组合跨座式单轨轨道梁初步截面形式,采用数值模拟方法对其受力情况进行分析,并通过改变轨道梁的顶板厚度、腹板厚度及底板厚度,以用钢量最省为目标对轨道梁初步截面形式进行优化。本文研究可为相关企业提出的宽度为 1 250 mm 的跨座式单轨列车截面形式提供参考依据。

1 预弯钢-混组合轨道梁构造设计

1.1 截面设计思路

预弯钢-混组合轨道梁是一种受弯构件,其主要内力为弯矩和剪力,主要宏观变形为挠度。预弯钢-混组合轨道梁的弯矩主要由上部混凝土和内部钢箱梁承担,剪力主要由钢箱梁腹板承担,其截面构造示意图如图 1 所示。混凝土主要设置于受压区,以充分发挥混凝土的抗压性能,走行部分使用混凝土结构能够较好地降低列车运行时的噪声,延缓钢结构疲劳开裂,延长使用寿命。预弯钢-混组合轨道梁内部采用钢箱梁,其不但自重轻,还能增强轨道梁的跨越能力。预弯钢-混组合轨道梁内部的钢箱梁两侧用混凝土包裹钢板,以防止钢板裸露在大气中受到腐蚀。预弯钢-混组合轨道梁底部设置有钢板,以方便施工和后期维护。

1.2 初步截面形式设计方案

预弯钢-混组合轨道梁的计算跨度为 24.2 m,

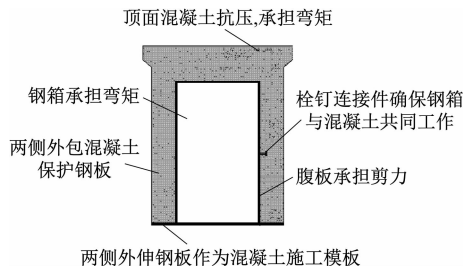


图 1 预弯钢-混组合轨道梁截面构造示意图

Fig. 1 Diagram of pre-bent steel-concrete composite track beam profile structure

由内部钢箱梁及其两侧与顶面外包混凝土组成,轨道梁梁高为 1.50 m,梁宽为 1.25 m。在钢箱梁的 3 个四等分点处,用临时支点向钢箱梁加反力使钢箱梁上拱。考虑钢箱梁腹板高厚比的限值要求,初步确定截面方案为,内部钢箱梁采用高度为 1 200 mm 的箱型截面,钢结构顶板厚度 t_1 、腹板厚度 t_w 、底板厚度 t_2 分别设定为 20 mm、24 mm、36 mm^[1-2]。根据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》可知,此截面符合钢箱梁的稳定性要求,混凝土与钢箱梁接触面设置剪力连接件。

2 预弯钢-混组合轨道梁数值模型

2.1 模型参数与单元选取

外包混凝土采用 C60 混凝土,纵筋为 HRB400 级钢筋,箍筋为 HRB300 级钢筋,内部钢箱梁选用 Q345 钢材,混凝土结构的主要设计力学参数:弹性模量为 3.75×10^4 MPa;泊松比为 0.2;轴心抗拉强度为 2.04 MPa;轴心抗压强度为 27.5 MPa。钢筋结构的主要设计力学参数:弹性模量为 2.0×10^5 MPa;屈服强度为 400 MPa;极限强度为 540 MPa。钢筋根数为 72 根,钢筋直径为 16 mm。

轨道梁的混凝土结构部分采用 C3D8R 单元模拟,本构模型采用塑性损伤模型;轨道梁的钢板部分采用 S4R 单元模拟,本构模型采用三折线线性强化弹塑性模型;轨道梁的钢筋部分采用 T3D2 单元模拟,本构模型采用双折线随动强化模型。

2.2 相互作用及边界条件

在纵筋、箍筋装配完后,采用 ABAQUS 软件中的 Merge 命令组成一个钢筋网架部件,用 Embedded 命令使钢筋网架嵌入混凝土中,以保证这两者协同工作,且不考虑这两者之间的相对滑移。在钢箱梁的顶板、腹板、底板上设置抗剪栓钉^[3],用 Tie 命令在混凝土表面与钢箱表面模拟抗剪栓钉的抗剪作

用。简支梁的边界条件为梁一端施加 x 、 y 、 z 向约束,另一端施加 x 、 y 向约束。通过结构化网格对模型进行划分,以边长为 150 mm 的实体单元作为轨道梁混凝土部分的网格划分精度,以边长为 150 mm 的壳单元作为轨道梁钢材部分的网格划分精度,以每 100 mm 一段的桁架单元作为钢筋构件的网格划分精度。

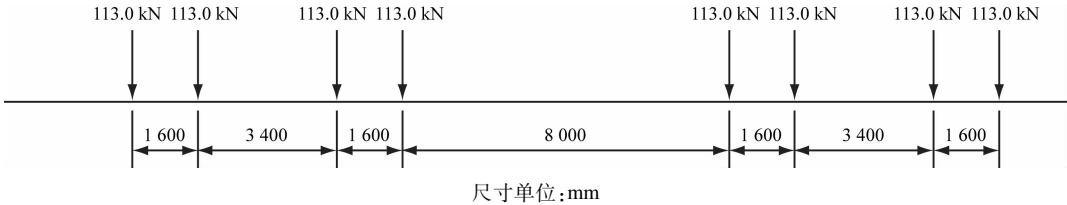


图 2 列车各静活载轴重布置示意图

Fig. 2 Diagram of axle load arrangement for each live and static load of the train

根据跨座式单轨轨道梁的受力情况,对荷载可能出现的^[4]最不利组合情况进行了计算。考虑荷载组合提高系数的影响,跨座式单轨轨道梁的主要荷载产生的各结构部分应力不得超过 TB 10092—

2.3 荷载工况

计算模型考虑以下几种荷载:①结构自重;②二期荷载(包括救援疏散通道自重及通信、信号、电力、接触轨等四电设备);③列车活载;④横向摇摆力;⑤风荷载;⑥温度荷载。计算模型的每节车有两对车轴,每个车轴最大轴重为 113 kN。列车各静活载轴重布置示意图如图 2 所示。

2017《铁路桥涵混凝土结构设计规范》和 TB 10091—2017《铁路桥梁钢结构设计规范》所规定限值。在不同荷载组合情况下,预弯钢-混组合轨道梁的容许应力提高系数如表 1 所示。

表 1 不同荷载组合情况下的预弯钢-混组合轨道梁容许应力提高系数

Tab. 1 Allowable stress increase coefficient of pre-bent steel-concrete composite track beam under different load combination conditions

工况编号	荷载组合	容许应力提高系数
1	自重 + 二期荷载 + 活载(走行) + 冲击荷载 + 横向摇摆力	1.00
2	自重 + 二期荷载 + 活载(走行) + 冲击荷载 + 横向摇摆力 + 整体升温荷载	1.15
3	自重 + 二期荷载 + 活载(走行) + 冲击荷载 + 横向摇摆力 + 整体降温荷载	1.15
4	自重 + 二期荷载 + 风载(无车)	1.15
5	自重 + 二期荷载 + 活载(走行) + 冲击荷载 + 横向摇摆力 + 风载(走行)	1.15
6	自重 + 二期荷载 + 整体升温荷载 + 风载(无车)	1.25
7	自重 + 二期荷载 + 整体降温荷载 + 风载(无车)	1.25
8	自重 + 二期荷载 + 活载(走行) + 冲击荷载 + 横向摇摆力 + 整体升温荷载 + 风载(走行)	1.25
9	自重 + 二期荷载 + 活载(走行) + 冲击荷载 + 横向摇摆力 + 整体降温荷载 + 风载(走行)	1.25

2.4 初步方案截面力学性能分析

2.4.1 刚度分析

在列车竖向静活载作用下,预弯钢-混组合轨道梁梁体产生的竖向最大挠度值为 4.76 mm,小于 GB 50458—2008《跨座式单轨交通设计规范》的允许挠度 30.25 mm,表明预弯钢-混组合轨道梁的竖向挠度满足要求。在横向摇摆力和温度荷载的作用下,预弯钢-混组合轨道梁梁体产生的横向最大挠度值为 1.26 mm,小于 GB 50458—2008《跨座式单轨交通设计规范》的允许挠度 6.05 mm,表明预弯

钢-混组合轨道梁的横向挠度满足要求。

2.4.2 强度分析

不同荷载组合下,预弯钢-混组合轨道梁荷载计算结果如表 2 所示。钢箱梁上缘最大正应力、钢箱梁下缘最大正应力和钢箱梁腹板最大剪应力在工况 8 时有最大值,分别为 85.60 MPa、237.10 MPa 和 57.55 MPa;混凝土顶面最大压应力在工况 9 时有最大值,为 14.62 MPa。根据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》可知,在 9 种荷载组合工况下,预弯钢-混组合轨道梁的强度均满足相关要求。然

而,初步设计方案中,各构件的受力远小于规范值,预弯钢-混组合轨道梁的钢材性能未获得充分利用,增加了施工成本,因此需继续对所设计的预弯钢-混组合轨道梁进行优化。

根据表 2 的计算结果,选取工况 8 作为轨道梁

钢箱梁上翼缘最大正应力、钢箱梁下翼缘最大正应力、钢箱梁腹板最大剪应力的最不利荷载工况,选取工况 9 作为混凝土顶面最大压应力的最不利工况,进一步对轨道梁的强度和刚度进行力学分析。

表 2 不同荷载组合情况下的预弯钢-混组合轨道梁荷载计算结果
Tab.2 Calculation results of pre-bent steel-concrete composite track beam loads under different load combination conditions

工况	钢箱梁上翼缘最大正应力/MPa	钢箱梁下翼缘最大正应力/MPa	混凝土顶面最大压应力/MPa	钢箱梁腹板最大剪应力/MPa
1	61.20(295.00)	138.50(295.00)	5.26(27.50)	35.56(170.00)
2	85.20(339.25)	226.00(339.25)	5.35(31.63)	53.38(195.50)
3	58.00(339.25)	70.19(339.25)	14.50(31.63)	12.12(195.50)
4	43.00(339.25)	102.00(339.25)	2.33(31.63)	21.42(195.50)
5	61.60(339.25)	151.40(339.25)	5.46(31.63)	39.43(195.50)
6	60.41(368.75)	178.90(368.75)	3.10(34.38)	32.78(212.50)
7	56.57(368.75)	61.20(368.75)	11.20(34.38)	10.72(212.50)
8	85.60(368.75)	237.10(368.75)	5.47(34.38)	57.55(212.50)
9	61.15(368.75)	72.03(368.75)	14.62(34.38)	12.01(212.50)

注:括号内数值为 GB 50017—2017《钢结构设计标准》和 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中的规定限值。

3 截面优化分析

3.1 优化目标及方案

在满足强度、刚度要求的前提下,以用钢量最省为优化目标,对预弯钢-混组合轨道梁初步设计方案进行截面优化,本文设计了 G1—G3 共 3 个组合的钢-混组合轨道梁方案,G1、G2、G3 方案分别以钢箱梁顶板厚度、腹板厚度、底板厚度作为变量,各截面参数组合如表 3 所示,其他参数均与初步方案模型参数保持一致。

表 3 钢-混组合轨道梁截面参数组合
Tab.3 Parameter combinations of steel-concrete composite track beam profile

方案	顶板厚度/mm	腹板厚度/mm	底板厚度/mm
G1	t_1	24	36
G2	20	t_w	36
G3	20	24	t_2

注: t_1 、 t_w 、 t_2 均可以分别取为 16 mm、20 mm、24 mm、28 mm、32 mm、36 mm。

3.2 优化截面参数分析

在最不利组合工况 8 和工况 9 下,由数值模拟结果可知,钢箱梁的顶板厚度、腹板厚度、底板厚度

变化对混凝土顶面最大正应力、轨道梁竖向挠度、轨道梁横向挠度影响较小,上下波动幅值均在 1% 左右,可忽略不计。钢箱梁的顶板厚度、腹板厚度、底板厚度对钢箱梁上翼缘最大正应力、钢箱梁下翼缘最大正应力、钢箱梁腹板最大剪应力的影响如图 3 所示。

由图 3 可知:①顶板厚度是影响钢箱梁上翼缘最大正应力的关键参数,随着钢箱梁顶板厚度增加、钢箱梁上翼缘最大正应力呈减小的趋势,减小幅值约为 2.3% ~ 7.8%;②底板厚度是影响钢箱梁下翼缘最大正应力的关键参数,随着钢箱梁底板厚度的增加,钢箱梁下翼缘最大正应力值呈减小的趋势,减小幅值约为 11.0% ~ 32.0%;③腹板厚度是影响钢箱梁腹板最大剪应力的关键参数,随着腹板厚度的增加,钢箱梁腹板最大剪应力值呈减小的趋势,减小幅值约为 2.2% ~ 6.6%。

根据预弯钢-混组合轨道梁强度变化规律,以钢材利用率高为目标,基于 GB 50017—2017《钢结构设计标准》,确定最终的截面方案:顶板厚度为 16 mm,腹板厚度为 20 mm ,底板厚度为 16 mm。

在最不利组合工况 8 和工况 9 下,将优化后的设计方案与初步设计方案的参数进行对比,如表 4

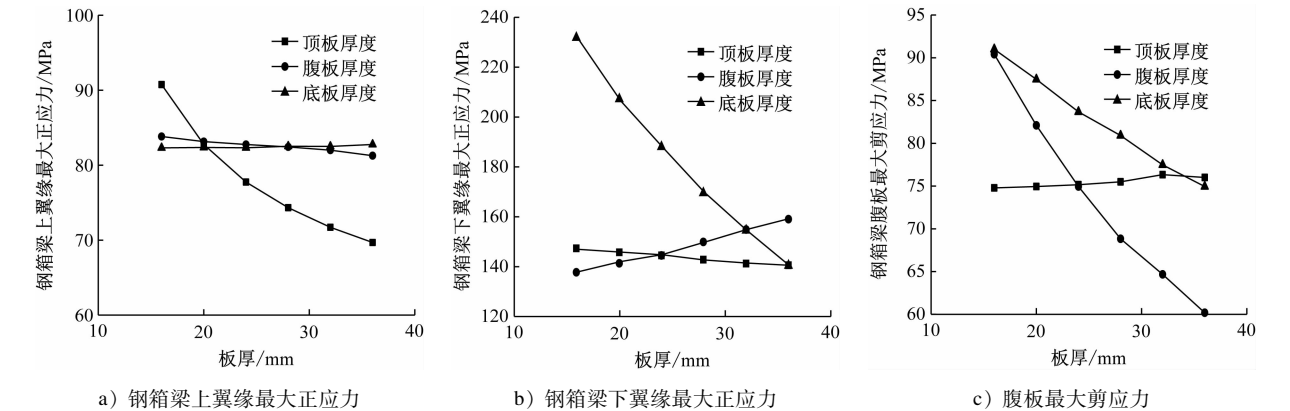


图 3 钢箱梁板厚变化对上翼缘最大正应力、下翼缘最大正应力和腹板最大剪应力的影响

Fig. 3 Influence of steel box beam plate thickness changes on upper flange maximum tensile stress, lower flange maximum tensile stress and web plate maximum shear stress

表 4 初步设计方案与优化设计方案参数对比

Tab. 4 Comparison of preliminary and optimized design scheme parameters

方案	钢箱梁上翼缘最大正应力/MPa	钢箱梁下翼缘最大正应力/MPa	混凝土顶面最大压应力/MPa	钢箱梁腹板最大剪应力/MPa	最大竖向挠度/mm	最大横向挠度/mm	钢材表面积/mm ²
初步设计方案	85.60	237.10	14.62	57.55	18.46	2.35	81 056
优化设计方案	98.63	319.23	14.27	88.34	26.24	3.51	56 832

所示。根据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》和 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》的规定,同时结合表 4 可知,优化方案中轨道梁的刚度和强度均满足设计要求,且钢材能够获得更大的利用率,与初步设计方案相比,钢材表面积减少了约 29.89%。

4 结语

针对新型跨座式单轨列车的特殊需求,设计了宽度为 1 250 mm 的跨座式单轨预弯钢-混组合轨道梁截面形式,基于传统轨道梁截面形式,在初步确定预弯钢-混组合轨道梁截面方案后,采用数值模拟的方法对其受力进行分析,强度、刚度均满足规范要求,并以用钢量最省为目标,对初步截面形式进行优化,确定了优化后的预弯钢-混组合轨道梁截面形式。主要获得以下结论:

1) 顶板厚度是影响钢箱梁上翼缘最大正应力的关键参数,随着钢箱梁顶板厚度增加、钢箱梁上翼缘最大正应力呈减小的趋势;底板厚度是影响钢箱梁下翼缘最大正应力的关键参数,随着钢箱梁底板厚度的增加,钢箱梁下翼缘最大正应力值呈减小的趋势;腹板厚度是影响钢箱梁腹板最大剪应力的关键参数,随着腹板厚度的增加,钢箱梁腹板最大

剪应力值呈减小的趋势。
2) 所提预弯钢-混组合轨道梁两种截面形式在最不利荷载组合工况下的强度与刚度均满足规范容许限值;所提优化截面参数方案的顶板厚度、腹板厚度、底板厚度分别为 16 mm、20 mm、16 mm;相较于初步截面方案,优化后的方案可以节省钢材表面积约 29.89%。

参考文献

[1] 谢向阳,朱尔玉,赵玮. 跨座式单轨交通预应力钢混组合轨道梁设计[J]. 铁道建筑技术, 2017(2): 50.
XIE Xiangyang, ZHU Eryu, ZHAO Yi. Design of prestressed steel-concrete composite track beam for straddle type monorail transit[J]. Railway Construction Technology, 2017(2): 50.
[2] 刘云飞. 跨座式连续钢混结合轨道梁桥静动力分析和温度效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
LIU Yunfei. Static and dynamic analysis and temperature effect research of cross-seat type continuous steel-concrete composite track beam bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
[3] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 94.
NIE Jianguo. Steel-concrete composite bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2011: 94.
[4] 赵玮. 预应力钢箱-混凝土组合梁的配筋分析和细部设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

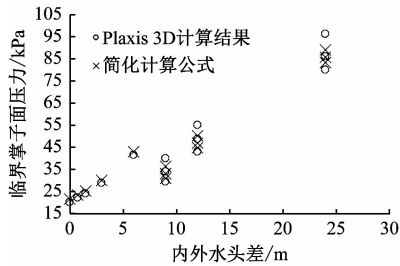


图 11 Plaxis 3D 数值计算与式(6)计算所得的开挖面临界支护压力对比

Fig. 11 Comparison of excavation face critical supporting pressure between Plaxis 3D numerical calculated and formula(6) calculated results

4 结语

通过 Optum G3 三维上下限极限分析和 Plaxis 3D 有限元数值模拟分析,分别明确了无渗流条件和发生渗流条件下的开挖面破坏模式。通过主要参数的敏感性分析,提出了计算全断面砂层的临界开挖面支护压力计算公式。主要获得以下结论:

1) 当 $C/D < 1.0$ 、 $\varphi \leq 25^\circ$ 时,开挖面破坏区从拱底发展至接近地面,容易发生浅层隧道冒顶破坏。当 $C/D \geq 1.0$ 、 $\varphi > 25^\circ$ 时,开挖面前方失稳破坏区局限于开挖面上方一定范围内,发生渗流时比无渗流时的破坏区域稍大。

2) 在开挖面无渗流情况下,富水砂土地层盾构隧道开挖面的临界支护土压力可采用 $p_f = 1.12e^{-4.09\sin\varphi} \gamma D$ 计算式进行计算,此外该计算值还需加上地下静止水土压力。

3) 在开挖面发生渗流情况下,富水砂层的临界开挖面压力可近似采用 $p_f = 1.12e^{-4.09\sin\varphi} \gamma' D + 0.105e^{0.015\gamma_w h_w} \frac{D}{C} \gamma_w D$ 计算式进行计算,两种方法的计算误差不大于 5%。

4) 对于不同的地下水状态,临界开挖面支护压

力排序为:未发生渗流的临界开挖面支护压力 > 发生渗流的临界开挖面支护压力 > 干砂条件下的开挖面临界压力。

参考文献

- [1] VERMEER P, RUSE N, MARCHER T. Tunnel heading stability in drained ground[J]. Felsbau, 2002, 20(6): 8.
- [2] IBRAHIM E, SOUBRA A H, MOLLON G, et al. Three-dimensional face stability analysis of pressurized tunnels driven in a multilayered purely frictional medium[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 18.
- [3] ANAGNOSTOU G, KOVÁRI K. Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(2): 165.
- [4] 黄振恩, 吴俊, 张洋, 等. 考虑流固耦合效应的盾构隧道开挖面稳定性研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 61. HUANG Zhen'en, WU Jun, ZHANG Yang, et al. Analysis of the stability of the shield tunnel excavation face considering fluid-solid coupling effect[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(5): 61.
- [5] ALAGHA A S N, CHAPMAN D N. Numerical modelling of tunnel face stability in homogeneous and layered soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 94: 103096.
- [6] KIRSCH A. Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand[J]. Acta Geotechnica, 2010, 5(1): 43.
- [7] QARMOUT M, KÖNIG D, GUSSMANN P, et al. Tunnel face stability analysis using Kinematical Element Method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 85: 354.

· 收稿日期:2022-11-28 修回日期:2023-04-25 出版日期:2024-02-10
Received:2022-11-28 Revised:2023-04-25 Published:2024-02-10
· 第一作者:张跃明,高级工程师,87433578@qq.com
通信作者:朱碧堂,教授, btangzh@hotmail.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

(上接第 99 页)

ZHAO Yi. The analysis about reinforcement of prestressed steel box-concrete composite beam and detailed design [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

Received:2021-07-19 Revised:2021-09-16 Published:2024-02-10
· 第一作者:刘媛媛,助理工程师,1726277196@qq.com
通信作者:杜鹃,讲师, dupeng@hebeu.edu.cn
· ©《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

· 收稿日期:2021-07-19 修回日期:2021-09-16 出版日期:2024-02-10