

上软下硬复合地层基于衬砌结构弯矩最小化的 隧道横断面优化设计*

张慧鹏¹ 张涛^{2,3} 石钰锋^{2,3} 赖世华⁴ 刘巍⁵

(1. 南昌轨道交通集团有限公司, 330038, 南昌; 2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 330013, 南昌; 3. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 330013, 南昌; 4. 中铁二院华东勘察设计有限责任公司, 310004, 杭州; 5. 南昌轨道房桥建材有限公司, 330096, 南昌)

摘要 [目的] 为有效防止隧道衬砌破损及渗漏水, 对上软下硬复合地层隧道横断面进行衬砌结构弯矩最小化设计研究。[方法] 根据复合地层隧道围岩压力特点及合理假设, 提出软土-硬土及土-岩两类复合地层隧道衬砌结构荷载作用模式。基于最理想的零弯矩复合地层隧道优化思路, 建立隧道横断面半结构力学模型, 计算得出零弯矩隧道横断面合理轴线方程, 以及复合地层分界线处及隧道横断面水平中线处直径解析表达式。简述了复合地层隧道横断面弯矩最小化设计流程。[结果及结论] 软土-硬土隧道零弯矩横断面合理轴线呈梨形, 土-岩隧道零弯矩横断面合理轴线呈类马蹄形; 实际工程可基于隧道横断面合理轴线方程, 通过综合评估和加权平均法来确定隧道横断面设计所需关键参数, 从而设计出新型上软下硬地层隧道横断面, 以期最大限度减少复合地层隧道横向变形。

关键词 轨道交通; 隧道横断面; 衬砌结构; 弯矩最小化; 上软下硬复合地层

中图分类号 U452.2⁺9:U25

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.032

Tunnel Cross-section Optimization Design in Upper-soft Lower-hard Composite Strata Based on Lining Structure Minimum Bending Moment

ZHANG Huipeng¹, ZHANG Tao^{2,3}, SHI Yufeng^{2,3}, LAI Shihua⁴, LIU Wei⁵

(1. Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., 330038, Nanchang, China; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China; 3. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China; 4. East China Survey and Design Co., Ltd. of China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 310004,

Hangzhou, China; 5. Nanchang Rail Housing and Bridge Building Materials Co., Ltd., 330096, Nanchang, China)

Abstract [Objective] To effectively prevent lining damage and water leakage in tunnels, research is carried out on minimizing lining structure bending moment for tunnel cross-section in upper-soft lower-hard composite strata. [Method] Soft soil-hard soil and soil-rock two types of loading modes for composite strata tunnel lining structures are proposed based on composite strata tunnel surrounding rock pressure characteristics and reasonable assumptions. Following the ideal optimization approach for a zero bending moment composite strata tunnel, a semi-structural mechanics model of tunnel cross-section is established. The rational axis equation of the zero bending moment tunnel cross-section and the analytical expressions of diameters at both composite strata boundary lines and the horizontal tunnel cross-section mid-line are calculated. The process of minimizing bending moment in composite strata tunnel cross-section is outlined briefly. [Result & Conclusion] The rational axis of the zero bending moment cross-section in soft soil-hard soil tunnel is pear-shaped, while in soil-rock tunnel, it is horseshoe-shaped. In practical engineering, based on the rational axis equation of tunnel cross-section, key parameters for tunnel cross-section design can be determined through comprehensive evaluation and weighted averaging method. This approach enables the design of new tunnel cross-sections in upper-soft and lower-hard strata, aiming to minimize lateral deformation in composite strata tunnels.

Key words rail transit; tunnel cross-section; lining structure; bending moment minimization; upper-soft lower-hard strata

我国隧道建设规模和范围不断扩大, 穿越地层愈加复杂, 尤其是在长江流域和珠江三角洲等地

* 国家自然科学基金面上项目(42177162); 江西省重点基金项目(20202ACB202005)

区,隧道开挖断面遭遇上软下硬复合地层屡见不鲜。隧道衬砌在此类地层中的受力情况与在均一土层中存在较大差异^[1-2]。

明确隧道衬砌上荷载的大小及其分布类型是进行隧道设计的先决条件,目前尚未形成系统、精确的复合地层隧道荷载计算方法。复合地层隧道荷载计算时常将其简化为均一地层,普遍采用修正惯用法荷载体系,这样往往会高估隧底硬土层力学响应,过分夸大隧底被动反力,使得隧底实际受荷状态与理论不符,容易导致结构配筋设计失当^[3-4]。根据复合地层隧道围岩压力实测数据发现^[5-7],围岩压力表现为隧道下部硬岩层明显小于上部软土层,且分布形态与修正惯用法荷载体系不同。文献[8]基于北京地铁隧道病害检测结果,分析出衬砌接缝变形是隧道椭圆化变形、衬砌错台及渗漏水等病害的根源。文献[9]基于断裂力学有限元方法研究隧道衬砌结构破损机制,发现衬砌在正弯矩作用下接头外弧面压碎引起破坏,以及在负弯矩作用下接头内弧面受到挤压、外弧面出现张角导致破坏。文献[10]发现复合地层隧道衬砌开裂机制为最大拉应力超过材料极限抗拉强度的受拉破坏,且衬砌最大主应力和剪力皆与衬砌所受弯矩息息相关。综上,传统修正惯用法具有一定的局限性。隧道穿越上软下硬复合地层,尤其是下部为硬土或硬岩层时,衬砌结构实际受荷状态与理论存在较大差异,且弯矩作用是引起隧道横断面变形及衬砌病害的关键因素。

为此,本文对上软下硬复合地层隧道横断面进行弯矩最小化设计研究。提出上软下硬复合地层隧道荷载作用理论简化模式,建立隧道横断面半结构力学模型,计算出隧道结构零弯矩合理轴线并进行优化。实际工程可基于此最大限度减少隧道结构弯矩,进而尽量减小隧道横向变形,有效防止衬砌破损及渗漏水。

1 复合地层隧道荷载作用模式分析

1.1 隧道围岩压力假设

本文对上软下硬复合地层隧道横断面设计进行优化研究,为简便计算分析及强化可操作性,考虑到隧道衬砌处于轴心受压状态,最理想的状态是使隧道任意横断面衬砌结构弯矩值为零,并做出合理假设。

1) 不考虑衬砌自重。根据 GB 50157—2013

《地铁设计规范》的规定,隧道衬砌结构厚度宜为隧道外轮廓直径的0.04~0.06倍,隧道覆土厚度不宜小于隧道外轮廓直径。因此,隧道衬砌结构自重相比其上覆土层导致的隧道衬砌结构弯矩要小很多,为适当简化分析,不考虑隧道衬砌结构自重是合理可行的。

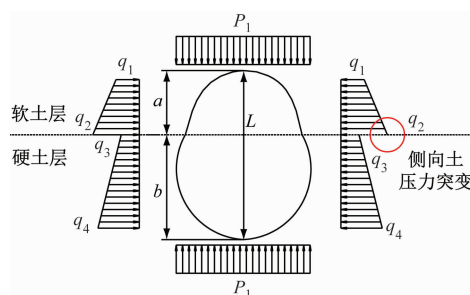
2) 软硬地层交界处侧向土压力存在突变。由于软土层与硬土层的侧向土压力系数和地层抗力系数不同,故侧向土压力即水平荷载分布模式有所差异。

3) 忽略隧道侧向地层抗力。隧道横断面优化设计的目的是使衬砌结构弯矩值为零,而隧道衬砌结构横向变形主要由弯矩引起,故隧道水平变形量非常小,因此可忽略不计隧道侧向地层抗力。

1.2 复合地层隧道荷载作用模式简化

1.2.1 软土-硬土复合地层

将隧道竖向土压力简化为均布荷载,根据地层条件和 GB 50157—2013 要求,可将隧道竖向土压力分为全土柱压力和松弛土压力两类。常规计算方法如下:覆土厚度小于 $(1\sim 2)D$ (D 为隧道洞径)时,按全土柱法计算。覆土厚度大于 $(1\sim 2)D$ 时:对于硬质黏土和砂性土,采用太沙基公式计算;对于软弱黏土,采用全土柱法计算。当隧道位于地下水位以下时,水、土压力根据 GB 50157—2013 规定,砂性土地层采用水土分算;黏性土地层在施工阶段应采用水土合算。本文先按一般情形进行理论分析,即隧道竖向土压力采用全土柱法计算,且地层符合水土合算。根据前述假设简化得到软土-硬土复合地层隧道衬砌结构荷载作用模式,如图1所示。



注: P_1 为软土-硬土复合地层下隧道顶部竖向土压力; q_1 、 q_2 为软土层顶、底部水平土压力; q_3 、 q_4 为硬土层顶、底部水平土压力; a 为软土层厚度; b 为硬土层厚度; L 为隧道横断面轴线竖向直径,须满足其使用功能和建筑限界要求等。

图1 软土-硬土复合地层隧道衬砌结构荷载作用模式

Fig. 1 Load action mode of soft soil-hard soil composite strata tunnel lining structure

软土-硬土复合地层隧道衬砌结构荷载计算公式如下:

$$P_1 = \gamma H \quad (1)$$

$$q_1 = \gamma H \lambda_1 \quad (2)$$

$$q_2 = (\gamma H + \gamma_s a) \lambda_1 \quad (3)$$

$$q_3 = (\gamma H + \gamma_s a) \lambda_2 \quad (4)$$

$$q_4 = (\gamma H + \gamma_s a + \gamma_h b) \lambda_2 \quad (5)$$

$$L = a + b \quad (6)$$

式中:

γ ——隧道上覆土体重度,土体分层时取平均重度;

γ_s, γ_h ——软、硬土层重度;

λ_1, λ_2 ——软、硬土层的侧压力系数;

H ——上覆土层厚度。

1.2.2 土-岩复合地层

确定该类地层隧道荷载计算模式的关键在于对下部岩层荷载的处理。根据 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》及地下结构设计理论^[11](如布加耶娃法、多铰圆环等),可将下部岩层水平围岩压力简化为均布荷载。根据前述假设可简化出土-岩复合地层隧道衬砌结构荷载作用模式,如图 2 所示。

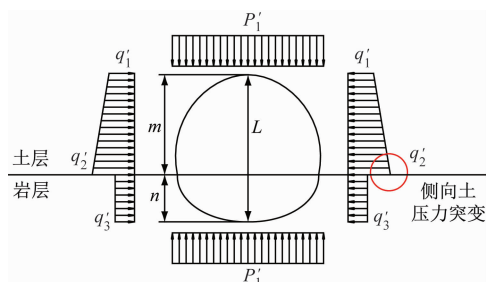


图 2 土-岩复合地层隧道衬砌结构荷载作用模式

Fig.2 Load action mode of soil-rock composite strata tunnel lining structure

土-岩复合地层隧道衬砌结构荷载计算公式如下:

$$P'_1 = \gamma H \quad (7)$$

$$q'_1 = \gamma H \lambda_3 \quad (8)$$

$$q'_2 = (\gamma H + \gamma_{ea} m) \lambda_3 \quad (9)$$

$$q'_3 = (\gamma H + \gamma_{ea} m) \lambda_2 + \gamma_{ro} n \lambda_2 / 2 \quad (10)$$

$$L = m + n \quad (11)$$

式中:

P'_1 ——土-岩复合地层下隧道顶部竖向土压力;

q'_1, q'_2 ——上部土层顶、底部水平土压力;

q'_3 ——下部岩层水平土压力;

γ_{ea}, γ_{ro} ——土、岩层重度;

λ_3, λ_4 ——土、岩层的侧压力系数;

m ——土层厚度;

n ——岩层厚度。

1.2.3 考虑松弛土压力或水土分算

若隧道上覆土层能形成较好的土拱效应,则采用太沙基理论、普氏理论或 TB 10003—2016 计算竖向围岩压力 P_1 或 P'_1 。若隧道处于地下水位以下,且地层符合水土分算,则需添加水压力引起的竖向围岩压力增量。

1) 软土-硬土复合地层隧道衬砌结构荷载计算公式如下:

$$P_1 = \gamma H + \gamma_w (h_w + L) \quad (12)$$

$$q_1 = \gamma H \lambda_1 + \gamma_w h_w \quad (13)$$

$$q_2 = (\gamma H + \gamma_s a) \lambda_1 + \gamma_w (h_w + a) \quad (14)$$

$$q_3 = (\gamma H + \gamma_s a) \lambda_2 + \gamma_w (h_w + a) \quad (15)$$

$$q_4 = (\gamma H + \gamma_s a + \gamma_h b) \lambda_2 + \gamma_w (h_w + L) \quad (16)$$

式中:

γ_w ——地下水的重度;

h_w ——地下水的高度。

2) 土-岩复合地层隧道衬砌结构荷载计算公式如下:

$$P'_1 = \gamma H + \gamma_w (h_w + L) \quad (17)$$

$$q'_1 = \gamma H \lambda_3 + \gamma_w h_w \quad (18)$$

$$q'_2 = (\gamma H + \gamma_s m) \lambda_3 + \gamma_w (h_w + m) \quad (19)$$

$$q'_3 = (\gamma H + \gamma_{ea} m) \lambda_2 + \gamma_{ro} n \lambda_2 / 2 + \gamma_w (h_w + L) \quad (20)$$

2 隧道横断面优化分析计算

2.1 横断面合理轴线力学模型

隧道衬砌结构可视作梁长远大于梁高的曲梁结构,且分析其受力变形特性时可看作平面应变问题,即衬砌厚度取单位长度。基于荷载-结构法,将简化的两类复合地层荷载施加到隧道衬砌结构横断面。由于隧道衬砌结构横断面对称,荷载作用亦对称,故根据结构力学,可取半结构进行分析,并对该结构施加固定端约束。软土-硬土复合地层隧道半结构力学模型,如图 3 所示。

对隧道横断面优化设计的最理想状态是使整个横断面弯矩为零。令 A、B 两处固定端弯矩为 0,由于荷载沿 y 方向对称,由此可知 A、B 两处固定端 y 方向轴力为 0。将图 3 进一步简化为如图 4 所示的隧道横断面合理轴线力学计算模型。

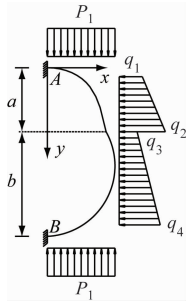


图3 软土-硬土复合地层隧道半结构力学模型

Fig. 3 Mechanical model of soft soil-hard soil composite strata tunnel semi-structure

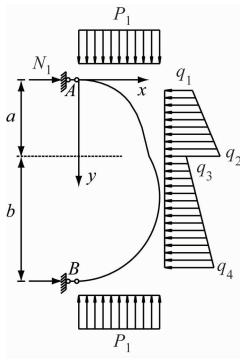


图4 隧道横断面合理轴线力学计算模型

Fig. 4 Calculation model of tunnel cross-section rational axis mechanics

由平衡条件 $\sum M_A = 0$ 和边界条件 $\sum x = 0$ 可得, A 处支座反力 N_1 为:

$$N_1 = \left[q_1 a \left(\frac{a}{3} - \frac{b}{2} \right) + q_2 \frac{a}{2} \left(\frac{a}{3} + b \right) + \frac{1}{3} q_3 b^2 + \frac{1}{6} q_4 b^2 \right] / L \quad (21)$$

$$x = \begin{cases} \pm \sqrt{\left(2N_1 y - q_1 y^2 - \frac{q_2 - q_1}{3a} y^3 \right) / P_1}, & 0 \leq y \leq a \\ \pm \sqrt{\left(2N_1 y - \frac{3ayq_1 - q_1 a^2}{3} - \frac{3ayq_2 - 2q_2 a^2}{3} - q_3 (y - a)^2 - \frac{(q_4 - q_3)(y - a)^3}{3b} \right) / P_1}, & a \leq y \leq L \end{cases} \quad (23)$$

$$x' = \begin{cases} \pm \sqrt{\left(2N'_1 y' - q'_1 y'^2 - \frac{q'_2 - q'_1}{3m} y'^3 \right) / P'_1}, & 0 \leq y' \leq m \\ \pm \sqrt{\left(2N'_1 y' - \frac{3my'q'_1 - q'_1 m^2}{3} - \frac{3my'q'_2 - 2q'_2 m^2}{3} - q'_3 (y' - m)^2 \right) / P'_1}, & m \leq y' \leq L \end{cases} \quad (24)$$

2.3 复合地层分界线处水平直径及隧道横断面水平中线处直径计算

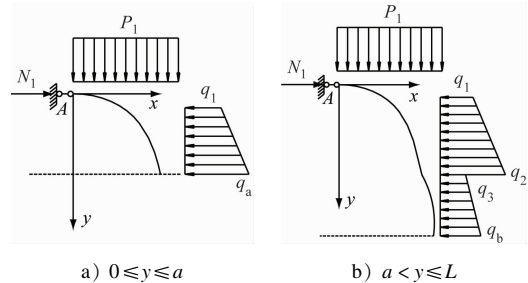
两类复合地层隧道横断面合理轴线示意图如图6所示。其中:软土-硬土复合地层中隧道横断面合理轴线呈梨形,土-岩复合地层中隧道横断面合理轴线呈类马蹄形。

同理,由土-岩复合地层隧道横断面合理轴线力学计算模型可得,A处支座反力 N'_1 为:

$$N'_1 = \left[q'_1 m \left(\frac{m}{3} - \frac{n}{2} \right) + q'_2 \frac{m}{2} \left(\frac{m}{3} + n \right) + \frac{1}{2} q'_3 n^2 \right] / L \quad (22)$$

2.2 隧道横断面合理轴线计算

同样以软土-硬土复合地层为例,根据结构力学可取隧道横断面上半部为隔离体。隧道隔离体受力分析图如图5所示。



注: q_a 为上部软土层沿 y 方向任意位置的侧向土压力; q_b 为下部硬土层沿 y 方向任意位置的侧向土压力。

图5 隧道隔离体受力分析图

Fig. 5 Stress analysis diagram of tunnel isolation body

图5中, q_a 和 q_b 可通过相似关系得出: $q_a = q_1 + \frac{y}{a}(q_2 - q_1)$; $q_b = q_3 + \frac{y-a}{b}(q_4 - q_3)$ 。

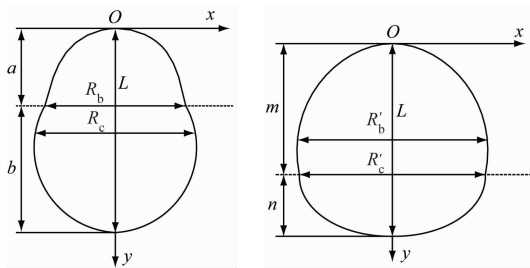
若要使隧道横断面任意截面弯矩为0,则需满足 $M_i = 0, M_j = 0$,即可得软土-硬土复合地层隧道横断面合理轴线方程,见式(23)。同理,计算出土-岩复合地层隧道横断面合理轴线方程,见式(24)。

$$R_c = \begin{cases} 2\sqrt{\left(N_1(a+b) - \frac{1}{4}q_1L^2 - \frac{q_2-q_1}{24a}(a+b)^3\right)/P_1}, & b \leq a \\ 2\sqrt{\left(N_1(a+b) - \frac{q_1a(a+3b)}{6} - \frac{q_2a(3b-a)}{6} - \frac{(b-a)^2q_3}{4} - \frac{(q_4-q_3)(b-a)^3}{24b}\right)/P_1}, & b > a \end{cases} \quad (25)$$

$$R_b = \pm\sqrt{\left(2N_1a - q_1a^2 - \frac{q_2-q_1}{3}a^2\right)/P_1} \quad (26)$$

$$R'_c = \begin{cases} 2\sqrt{\left(N'_1(m+n) - \frac{1}{4}q'_1(m+n)^2 - \frac{q'_2-q'_1}{24a}(m+n)^3\right)/P'_1}, & n \leq m \\ 2\sqrt{\left(N'_1(m+n) - \frac{q'_1m(m+3n)}{6} - \frac{q'_2m(3n-m)}{6} - \frac{(n-m)^2q'_3}{4}\right)/P'_1}, & n > m \end{cases} \quad (27)$$

$$R'_b = \pm\sqrt{\left(2N'_1m - q'_1m^2 - \frac{q'_2-q'_1}{3}m^2\right)/P'_1} \quad (28)$$



a) 软土-硬土复合地层

b) 土-岩复合地层

图6 两类复合地层隧道横断面合理轴线示意图

Fig. 6 Diagram of cross-section rational axis of two types of composite strata tunnels

3 基于零弯矩隧道横断面合理轴线优化设计

轨道交通实际工程中,隧道往往只选用一种类型横断面。因为变截面隧道区间要求更精进的技术水平,较为复杂,安全要求相对更高。因此,可通过综合调研和评估整条隧道区间全部设计横断面的围岩压力,确定具有代表性的复合地层荷载作用模式,采用本文所述弯矩最小化设计方法,最终确定一种隧道横断面形式作为优化设计方案,以期最大限度地减少整个隧道区间所受弯矩。

优化设计中所需的关键参数主要是围岩压力,以及软土层、硬土层或岩层的类型与厚度。因此,可以采用加权平均法^[12]对其进行综合评估。

对于上覆土层围岩竖向压力,将总长为 S 的整个隧道区间分为若干段 $S_{p,i}$ ($i=1,2,\dots,k$),每段对应的围岩竖向压力为 $P_{v,i}$ ($i=1,2,\dots,k$)。则竖向围岩压力 P_1 或 P'_1 为:

$$P_1 = \frac{P_{v,1}S_{p,1} + P_{v,2}S_{p,2} + \dots + P_{v,k}S_{p,k}}{S} \quad (29)$$

根据隧道使用要求初步确定其横断面竖向直径后,根据地勘报告确定全线隧道各区段穿越复合土层的具体情况。以软土-硬土复合地层隧道为例,将隧道区间分成若干段 $S_{c,j}$ ($j=1,2,\dots,k$),每段对应的软土层厚度为 a_j ($j=1,2,\dots,k$),硬土层厚度为 b_j ($j=1,2,\dots,k$)。

通过加权平均法求得软土层和硬土层的厚度分别为:

$$a = \frac{a_1S_{c,1} + a_2S_{c,2} + \dots + a_kS_{c,k}}{S} \quad (30)$$

$$b = \frac{b_1S_{c,1} + b_2S_{c,2} + \dots + b_kS_{c,k}}{S} \quad (31)$$

同理,对于土-岩复合地层隧道,土层和岩层的厚度分别为:

$$m = \frac{m_1S_{c,1} + m_2S_{c,2} + \dots + m_kS_{c,k}}{S} \quad (32)$$

$$n = \frac{n_1S_{c,1} + n_2S_{c,2} + \dots + n_kS_{c,k}}{S} \quad (33)$$

通过 $L=a+b$ 或 $L=m+n$,即可得到最终的隧道横断面竖向直径 L 。

同理, λ_1 、 λ_2 、 λ_3 及 λ_4 需基于岩土体类型,根据式(23)一式(28)进行计算。本文的优化设计方法考虑衬砌承受对称荷载,不考虑地震力及周边工程活动产生的水平作用。实际应用时,还需满足隧道建筑功能净空要求。复合地层隧道横断面弯矩最小化设计流程,如图7所示。

4 结语

1) 根据复合地层隧道围岩压力特点及合理假设,从理论上简化出软土-硬土及土-岩两类复合地层隧道衬砌结构荷载作用模式。

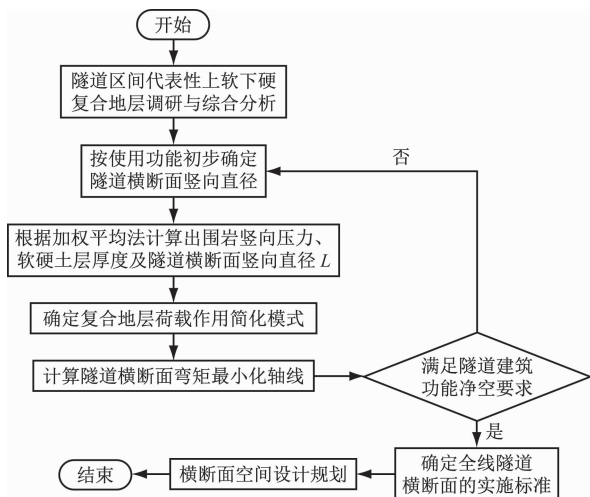


图7 复合地层隧道横断面弯矩最小化设计流程

Fig.7 Design process for minimizing composite strata tunnel cross-section bending moment

2) 基于最理想的零弯矩复合地层隧道优化思路,建立隧道横断面半结构力学模型,提出隧道横断面合理轴线方程,以及复合地层分界线处及隧道横断面水平中线处直径解析表达式。

3) 软土-硬土复合地层隧道横断面合理轴线呈梨形,土-岩复合地层隧道横断面合理轴线呈类马蹄形。

4) 基于隧道横断面合理轴线方程,通过综合评估和加权平均法确定隧道横断面弯矩最小化所需要的关键参数,以期最大限度减少隧道衬砌结构所受弯矩,进而尽量减小隧道横向变形,可有效防止衬砌破损及渗漏水。

参考文献

- [1] 张恒,陈寿根,陈亮. 软硬不均地层盾构隧道管片力学行为研究[J]. 铁道标准设计, 2012, 56(8): 83.
ZHANG Heng, CHEN Shougen, CHEN Liang. Research on mechanical behaviour of shield tunnel segments in soft-hard uneven strata[J]. Railway Standard Design, 2012, 56(8): 83.
- [2] 何川,张建刚,杨征. 层状复合地层条件下管片衬砌结构力学特征模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1537.
HE Chuan, ZHANG Jiangang, YANG Zheng. Model tests on mechanical characteristics of segment lining structure under multi-layered strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1537.
- [3] 肖明清,封坤,李策,等. 复合地层盾构隧道围岩压力计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1836.
XIAO Mingqing, FENG Kun, LI Ce, et al. A method for calculating the surrounding rock pressure of shield tunnels in compound strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1836.
- [4] 黄戡,孙逸玮,赵磊,等. 盾构穿越上软下硬复合地层时的管片力学特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(5): 1371.
HUANG Kan, SUN Yiwei, ZHAO Lei, et al. Mechanical properties of segments when shield passes through upper-soft and lower-hard composite strata[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(5): 1371.
- [5] 梁敏飞,张哲,李策,等. 盾构隧道双层衬砌结构三维力学分析模型及验证[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 892.
LIANG Minfei, ZHANG Zhe, LI Ce, et al. Three-dimensional mechanical analysis model and verification of shield tunnels with double-layer linings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 892.
- [6] 周济民,何川,肖明清,等. 狮子洋水下盾构隧道衬砌结构受力的现场测试与计算分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 115.
ZHOU Jimin, HE Chuan, XIAO Mingqing, et al. Field test and numerical simulation of mechanics of segment lining of Shiziyang underwater shield tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 115.
- [7] 张杰. 复杂地质环境下盾构隧道荷载作用模式研究[D]. 常州: 常州大学, 2021.
ZHANG Jie. Research on load action mode of shield tunnel in complicated geological environment[D]. Changzhou: Changzhou University, 2021.
- [8] 董飞,房倩,张顶立,等. 北京地铁运营隧道病害状态分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 104.
DONG Fei, FANG Qian, ZHANG Dingli, et al. Analysis on defects of operational metro tunnels in Beijing[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 104.
- [9] 杨雨冰,谢雄耀. 基于断裂力学的盾构隧道管片结构开裂破坏机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2114.
YANG Yubing, XIE Xiongyao. Breaking mechanism of segmented lining in shield tunnel based on fracture mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2114.
- [10] 苏昂,王士民,何川,等. 复合地层盾构隧道管片施工病害特征及成因分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 683.
SU Ang, WANG Shimin, HE Chuan, et al. Disease characteristics and causes analysis of segments of shield tunnels in composite stratum during construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 683.
- [11] 李志业,曾艳华. 地下结构设计原理与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003.
LI Zhiye, ZENG Yanhua. Design principle and method of underground structure[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003.

(下转第 199 页)

- Construction, 2023, 43(6): 1003.
- [17] 邓一三, 李刚, 张建伟, 等. 防水型单层衬砌的叠合面力学性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(3): 776.
- DENG Yisan, LI Gang, ZHANG Jianwei, et al. Study on composite surface of waterproof single-layer lining by tests [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(3): 776.
- [18] 李德明, 温书亿, 张建伟, 等. 单层衬砌聚烯烃粗纤维喷射混凝土性能试验及工程应用[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 195.
- LI Deming, WEN Shuyi, ZHANG Jianwei, et al. Performance test and engineering application of macro-polyolefin fiber reinforced shotcrete used as single-shell lining[J]. Modern Tunneling Technology, 2021, 58(2): 195.
- [19] 温书亿, 严金秀, 郑波. Tam seal800 喷涂防水在成都地铁区间隧道的应用[C]//中国土木工程学会. 第八届国际桥梁与隧道技术大会论文集. 北京:中国土木工程学会, 2019: 269.
- WEN Shuyi, YAN Jinxiu, ZHENG Bo. Application of Tam Seal800 spray applied waterproofing membrane for Chengdu Metro tunnels[C]//Chinese Civil Engineering Society. Proceedings of the 8th International Conference on Bridge and Tunnel Technology. Beijing: Chinese Civil Engineering Society, 2019: 269.
- 收稿日期:2023-12-07 修回日期:2024-02-15 出版日期:2024-08-10
Received:2023-12-07 Revised:2024-02-15 Published:2024-08-10
• 通信作者:温书亿,高级工程师,359418435@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
-
- (上接第 191 页)
- [12] 黄大维, 冯青松, 刘开富, 等. 基于弯矩最小化的地铁盾构隧道横断面优化设计分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(9): 159.
- HUANG Dawei, FENG Qingsong, LIU Kaifu, et al. Analysis for optimal design of cross section of metro shield tunnel based on minimum bending moment[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 159.
- 收稿日期:2022-03-11 修回日期:2022-04-24 出版日期:2024-08-10
Received:2022-03-11 Revised:2022-04-24 Published:2024-08-10
• 第一作者:张慧鹏,高级工程师,2873565471@qq.com
通信作者:张涛,硕士研究生,zt04200305@163.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

国家铁路局将在粤港澳大湾区试点基础上协调推进 更大范围的“四网融合”试点

2024年7月10日,国务院新闻办举行“推动高质量发展”系列主题新闻发布会。会上,国家铁路局局长费东斌表示,将在粤港澳大湾区试点的基础上,协调推进更大范围的“四网融合”试点推广工作,大力推进区域一体化发展,更好服务国家重大战略实施。

“四网融合”指的是干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路和城市轨道交通的融合,主要指的是地铁和城际铁路、市域(郊)铁路的融合与互联互通。随着国家区域战略的实施,“四网融合”的需求就越来越强烈,党中央、国务院在《交通强国建设纲要》和《国家综合立体交通网规划纲要》等战略规划中进行了专门部署。“四网融合”中存在的问题和难点主要就是地铁和铁路之间的制式不统一、标准不统一和管理不一致。针对这些问题,国家铁路局正在和相关部门、省份对接,以广东省粤港澳大湾区为试点,大力推动“四网融合”工作,着力打造具有中国特色的轨道交通融合发展模式。下一步,协调推进更大范围的“四网融合”试点推广工作,将着力在设施互联、票制互通、安检互信、信息共享和管理协同等方面下功夫。

在设施互联方面,将聚焦多运营主体、多层次轨道交通互联互通需求,制定基础设施、机车客车、牵引供电、通信信号等互联互通技术规范,研究构建互联互通接入规则。在票制互通方面,将制定票制互通、支付兼容等相关标准,研究制定票制互通工程实施方案,积极拓展“一次购票、一次支付”服务模式。在安检互信方面,将促进铁路和地铁安检标准的衔接互认,完善换乘条件,更新补强安检设施设备,进一步优化安检流程。在信息共享方面,将研究数据资源开放共享机制和交换渠道,制定数据采集、数据安全等标准,促进各类信息的开放共享。在管理协同方面,将研究制定相关制度办法,完善铁路运输基础设施、车辆、驾驶人员资格等许可,推进铁路和地铁在设备运用、运营组织、从业人员等方面的管理互通。

(来源:新华网)